



TUGAS AKHIR (*Desain*) - TM141585

**PEMODELAN DAN ANALISA ENERGI LISTRIK
AKIBAT PENGARUH PENAMBAHAN *FLYWHEEL*
PADA MODEL MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA GELOMBANG LAUT TIPE *SALTER DUCK***

SINTA KHALIDA MARLISA
NRP. 2113 106 001

Dosen Pembimbing
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TM141585

***MODELING AND ANALYSIS OF THE ELECTRICAL
ENERGY DUE TO FLYWHEEL ADDITION IN AN
OCEAN WAVE POWER PLANT SALTER DUCK
MECHANISM***

SINTA KHALIDA MARLISA
NRP. 2113 106 001

Academic Supervisor
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

**PEMODELAN DAN ANALISA ENERGI LISTRIK
AKIBAT PENGARUH PENAMBAHAN FLYWHEEL
PADA MODEL MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA GELOMBANG LAUT TIPE SALTER DUCK**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

Bidang Studi Desain

Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Sinta Khalida Marlisa

NRP. 2113 106 001

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

(NIP.197004121997032003)



(Pembimbing)

2 Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.

(NIP. 197505111999031001)



(Penguji I)

3. Moch. Solichin, ST., MT.

(NIP. 198908172015041003)



(Penguji II)

4. Aida Annisa Amin Daman, ST., MT.

(NIP. 198907052015042005)



(Penguji III)

SURABAYA

Januari, 2016

**PEMODELAN DAN ANALISA ENERGI LISTRIK AKIBAT
PENGARUH PENAMBAHAN *FLYWHEEL* PADA MODEL
MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
GELOMBANG LAUT TIPE *SALTER DUCK***

Nama Mahasiswa	: Sinta Khalida Marlisa
NRP	: 2113106001
Jurusan	: Teknik Mesin
Dosen Pembimbing	: Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT

ABSTRAK

Indonesia sekarang sedang mengalami kekurangan energi listrik dimana kapasitas daya pembangkit listrik masih kalah jauh dari kebutuhan penduduk. Oleh karena itu dibutuhkan alternatif energi terbarukan, misalnya dengan pemanfaatan energi laut. Dengan luas perairan hampir 60% dari total luas wilayahnya, Indonesia memiliki potensi energi laut yang besar. Jenis potensi energi laut yang diratifikasi oleh versi ASELI (Asosiasi Energi Laut Indonesia) pada tahun 2011 yaitu arus pasang surut memiliki potensi teoritis 160 GW, sedangkan panas laut memiliki potensi teoritis 57 GW, serta yang terakhir gelombang laut memiliki potensi teoritis 510 GW. Dari ketiga jenis energi laut yang ada, dipilihlah energi gelombang laut sebagai fokus pada penelitian ini.

Penelitian ini dititikberatkan pada pemodelan dan simulasi dari model mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut tipe *Salter Duck* dengan penambahan *flywheel*, guna membandingkan bagaimana pengaruh dari penambahan *flywheel* pada model mekanisme tersebut, juga pengaruh dari amplitudo dan frekuensi terhadap energi listrik yang dihasilkan. Energi yang dihasilkan PLTGL ini yaitu berasal dari gaya gelombang laut yang dikonversi melalui bagian yang berbentuk *duck's tail* sehingga menghasilkan gerakan naik turun (*pitching*). Kemudian gerak naik turun itu akan diteruskan ke *gearbox* melalui rantai *sprocket*. *Gearbox* dihubungkan ke generator menggunakan induksi elektromagnetik. Pada *gearbox* telah ditambahkan *flywheel* yang berfungsi sebagai penyimpan energi yang dihasilkan oleh putaran poros *gearbox* pada saat *nodding duck* bergerak turun, sehingga pada saat *nodding duck* bergerak naik, energi yang tersimpan pada *flywheel* akan didistribusikan ke poros *gearbox* yang terhubung ke generator. Variasi yang dilakukan pada penelitian ini yaitu variasi diameter *flywheel* (6.5, 7,

dan 7.5 cm) dan variasi frekuensi gelombang (0.7, 0.8, dan 0.9 Hz), serta amplitudo gelombang (0.020, 0.031, dan 0.032 m).

Hasil keluaran energi bangkitan berupa arus, voltase, dan daya tertinggi dihasilkan pada simulasi model mekanisme PLTGL tipe *Salter Duck* dengan penambahan *flywheel* berdiameter 7.5 cm pada frekuensi 0.9 Hz dan amplitudo 0.032 m dengan nilai masing-masing sebesar 0.00049 A, 0.5779 V, dan 0.3202 mWatt. Hubungan antara diameter *flywheel* dengan energi bangkitan yaitu berbanding lurus, sehingga semakin besar diameter *flywheel* maka semakin besar pula energi bangkitan yang dihasilkan. Begitu pula hubungan antara frekuensi & amplitudo gelombang dengan energi bangkitan yaitu berbanding lurus, sehingga semakin besar frekuensi & amplitudo gelombang maka semakin besar pula energi bangkitan yang dihasilkan. Energi bangkitan yang dihasilkan simulasi lebih besar dibandingkan energi bangkitan yang dihasilkan studi eksperimen model mekanisme dengan *error* sebesar 25.02%.

Kata kunci: *Flywheel*, Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut, Pemodelan dan Simulasi, *Salter Duck*.

MODELING AND ANALYSIS OF THE ELECTRIC ENERGY DUE TO FLYWHEEL ADDITION IN AN OCEAN WAVE POWER PLANT SALTER DUCK MECHANISM

Student Name	: Sinta Khalida Marlisa
NRP	: 2113106001
Department	: Mechanical Engineering
Advisor	: Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT

ABSTRACT

Indonesia is currently experiencing a shortage of electrical energy due to the lack of power capacity produced by power plants. Therefore, an alternative renewable resources of energy is needed, such as ocean energy utilization. With almost 60% of the total area consist of water, Indonesia surely has great potentials from ocean energy. The potential of ocean energy which already confirmed by ASELI (Indonesian Ocean Energy Association) in 2011 consist of tidal power which has 160 GW, ocean thermal energy which has 57 GW, and wave energy which has 510 GW in theoretic potential. Out of the three types of ocean energy, the wave energy is chosen as the focus of this research.

This research focused on modeling and simulation of the Ocean Wave Power Plant Salter Duck system prototype with flywheel addition, in order to know the effect of the flywheel addition, as well as the effect of the wave frequency and amplitude variation towards the electric energy produced. The energy which produced by this Ocean Wave Power Plant is originated from the ocean wave force which converted through the duck and generating the pitching movement. Then the pitching movement will be forwarded to the gearbox by the roller chain and sprocket. Electromagnetic induction is used to connect the gearbox and the generator. A flywheel is added to the gearbox as an energy storage which produced by the gearbox's shaft rotation when the nodding duck move, so when the nodding duck is not moving, the energy which stored in the flywheel will be distributed to the gearbox's shaft which is connected to the generator. The variation used in this research is flywheel's diameter variation (6.5, 7, and 7.5 cm), and the frequency of the wave variation (0.7, 0.8, and 0.9 Hz) as well as the amplitude of the wave (0.020, 0.031, and 0.032 m).

The highest value of the current, voltage, and power output is produced by the simulation of the Ocean Wave Power Plant salter duck prototype added with 7.5 cm flywheel at the 0.9 Hz frequency and 0.032 m amplitude with each value is 0.00049 A, 0.5779 V, and 0.3202 mWatt. The correlation between diameter of the flywheel and energy output is straightly proportional, so the higher the diameter of the flywheel, the higher energy output will be produced. The correlation between the frequency and amplitude of the wave and energy output is straightly proportional too, so the higher the frequency and amplitude of the wave, the higher energy output will be produced. The energy generated by the simulation is higher than the energy generated by the experiment with 25.02% error.

Keywords: Flywheel, Modeling and Simulation, PLTGL, Salter Duck.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis curahkan sepenuhnya kepada Allah SWT, karena atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya tugas akhir ini dapat terselesaikan. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moril maupun materil dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Ibunda dan ayahanda tercinta Dian Lilis dan Martin Erwan yang senantiasa memberikan dorongan semangat dan moril bagi penulis untuk terus berusaha menuntut ilmu semoga Allah SWT selalu memberikan rahmat serta hidayah-Nya.
2. Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis. Terima kasih atas kesabarannya selama membimbing penulis.
3. Bapak Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng, Ibu Aida Annisa Amin Daman, ST., MT. dan Bapak Moch. Solichin, ST., MT. selaku dosen penguji proposal dan sidang tugas akhir penulis, terima kasih atas masukan yang telah diberikan.
4. Bapak Ary Bachtiar K. P., ST., MT., PhD selaku dosen wali penulis, terima kasih atas bantuannya selama ini.
5. Bapak Ir. Bambang Pramujati, MSc. Eng. PhD selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin yang telah menjadi ujung tombak dari kemajuan Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
6. Kedua adik penulis Bilqisina dan Azelia, serta keluarga besar yang telah memberikan semangat dan selalu menghibur di kala penat.
7. Muhammad Arizky Rahmadillah Margo Agung yang paling baik, sabar, pengertian, dan selalu standby 24/7 walaupun sering marah-marah.

8. Sahabat-sahabat terbaik penulis, Rizki Harifatul, Mabruy Widjara, dan Victor Ricardo yang tidak pernah bosan mendengar keluh kesah penulis.
9. Rekan-rekan laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis, terutama Saifudin Nur, Irvan Yusup, Yabes, Yogi, Mas Yoga, dan Pak Made yang sama-sama berjuang demi wisuda 113.
10. Rekan-rekan laboratorium Proses Manufaktur, Rozaq, Arizky, Fakhrudin, dan Hanif yang telah menyediakan lab dengan segala fasilitasnya.
11. Jakarta Team Ade Iskandar, Arif Maulana, Akbar Adrieq, Irvan Yusup, Antonius Danny, M. Faiz, Saifudin, Galih Setyo, Cheridolang, dan Handy Prasetya yang senantiasa menghibur walaupun sering berwacana.
12. Seluruh teman-teman Lintas Jalur angkatan 2013 genap yang saling bahu-membahu menghadapi kerasnya ITS.
13. Semua pihak yang belum disebutkan oleh penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, 25 Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

Abstrak	i
<i>Abstract</i>	iii
Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	ix
Daftar Tabel	xiii
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.1.1 Penelitian Terdahulu Tentang <i>Salter Duck</i>	5
2.2 Dasar Teori	10
2.2.1 Gelombang Air Laut	10
2.2.1.1 Analisa Gaya pada Gelombang	13
2.2.2 <i>Salter Duck</i>	15
2.2.2.1 Gaya yang Dihasilkan Untuk Menggerakkan <i>Salter Duck</i>	16
2.2.3 Mekanika Getaran	16
2.2.3.1 <i>Multidegree of Freedom System</i>	16
2.2.3.2 Sistem Rotasi Mekanis	20
2.2.3.3 Frekuensi Natural	22
2.2.4 Elemen Mesin	22
2.2.4.1 Roda Gigi Lurus (<i>Spur Gear</i>)	22
2.2.4.2 <i>Flywheel</i>	24
2.2.4.3 Generator	25
BAB III. METODE PENELITIAN	27
3.1 Tahapan Penelitian	27
3.1.1 <i>Flowchart</i> Penelitian	27
3.2 Penjelasan <i>Flowchart</i> Penelitian	28

BAB IV. ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN	55
4.1 Mekanisme Alat dan Parameter yang Digunakan pada Simulasi	55
4.1.1 Mekanisme Alat	55
4.1.2 Parameter yang Digunakan pada Simulasi	56
4.2 Analisa	58
4.2.1 Karakteristik Gelombang Laut	58
4.2.2 Percepatan Sudut dan Torsi Poros <i>Output</i>	59
4.2.2.1 Model Mekanisme tanpa Penambahan <i>Flywheel</i>	60
4.2.2.2 Model Mekanisme dengan Penambahan <i>Flywheel</i>	61
4.2.3 Energi Bangkitan yang Dihasilkan	63
4.2.3.1 Karakteristik Voltase yang Dihasilkan Model Mekanisme	63
4.2.3.2 Karakteristik Arus yang Dihasilkan Model Mekanisme	65
4.2.3.3 Karakteristik Daya yang Dihasilkan Model Mekanisme	67
4.3 Pembahasan	69
4.3.1 Pengaruh Penambahan <i>Flywheel</i> Terhadap Voltase dan Daya yang Dihasilkan <i>Salter Duck</i>	71
4.3.2 Pengaruh Variasi Frekuensi & Amplitudo Terhadap Voltase dan Daya yang Dihasilkan <i>Salter Duck</i>	72
4.3.3 Perbandingan antara Vrms Hasil Eksperimen dan Simulasi Model Mekanisme	73
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	77
5.1 Kesimpulan	77
5.2 Saran	78
Daftar Pustaka	xv

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Nomenclature for The Nodding Duck Wave Converter</i>	6
Gambar 2.2 <i>Prototype Salter duck</i> Albi dan Yaqin	7
Gambar 2.3 <i>Prototype Salter duck</i> Akbar dan Amir	9
Gambar 2.4 Karakteristik Ombak	13
Gambar 2.5 Geometri <i>Salter duck</i>	15
Gambar 2.6 <i>Spring-mass-damper System</i>	17
Gambar 2.7 Momen Inersia Batang dan Poros	20
Gambar 2.8 Roda Gigi Lurus	23
Gambar 2.9 Pasangan Roda Gigi	23
Gambar 2.10 <i>Free-body diagram</i> Roda Gigi Berpasangan	24
Gambar 2.11 <i>Flywheel</i>	25
Gambar 2.12 Generator DC	26
Gambar 3.1 Flowchart Penelitian Pemodelan dan Simulasi PLTGL Tipe <i>Salter Duck</i>	27
Gambar 3.2 Model Mekanisme PLTGL Tipe <i>Salter Duck</i>	29
Gambar 3.3 <i>Free-body Diagram Nodding Duck</i>	30
Gambar 3.4 Rancangan <i>Gearbox</i>	31
Gambar 3.5 (a) <i>Gearbox</i> saat <i>Nodding Duck</i> Turun, dan (b) Model Dinamis dari <i>Gearbox</i> saat <i>Nodding Duck</i> bergerak Turun	32
Gambar 3.6 (a) <i>Roller chain 1 & sprocket 2</i> , dan (b) <i>Free-body diagram</i> dari <i>roller chain 1 & sprocket 2</i>	34
Gambar 3.7 (a) <i>Gear 3</i> , dan (b) <i>Free-body diagram gear 3</i>	35
Gambar 3.8 (a) <i>Gear 4</i> , dan (b) <i>Free-body diagram gear 4</i>	36
Gambar 3.9 (a) <i>Gear 5</i> , dan (b) <i>Free-body diagram gear 5</i>	38
Gambar 3.10 (a) <i>Gear 6</i> , dan (b) <i>Free-body diagram gear 6</i>	39
Gambar 3.11 (a) <i>Gear 7</i> , dan (b) <i>Free-body diagram gear 7</i>	41
Gambar 3.12 (a) <i>Flywheel</i> , dan (b) <i>Free-body diagram flywheel</i>	42
Gambar 3.13 (a) <i>Gear 8</i> , dan (b) <i>Free-body diagram gear 8</i>	43

Gambar 3.14 (a) <i>Gear 9</i> , dan (b) <i>Free-body diagram gear 9</i>	44
Gambar 3.15 (a) <i>Gear 10</i> , dan (b) <i>Free-body diagram gear 10</i>	46
Gambar 3.16 Diagram Sirkuit Elektromagnetik Generator	47
Gambar 3.17 (a) <i>Gearbox</i> saat <i>Nodding Duck</i> Naik, dan (b) Model Dinamis dari <i>Gearbox</i> saat <i>Nodding Duck</i> bergerak Naik	48
Gambar 3.18 (a) <i>Roller chain 1 & sprocket 11</i> , dan (b) <i>Free-body diagram</i> dari <i>roller chain 1 & sprocket 11</i>	49
Gambar 4.1 Model Mekanisme PLTGL tipe <i>Salter Duck</i>	55
Gambar 4.2 F_{wave} yang Dihasilkan dari Variasi Frekuensi & Amplitudo	59
Gambar 4.3 (a) Percepatan Sudut (α), dan (b) Torsi yang Dihasilkan Poros <i>Output</i> tanpa Penambahan <i>Flywheel</i>	60
Gambar 4.4 (a) Percepatan Sudut (α), dan (b) Torsi yang Dihasilkan Poros <i>Output</i> Dengan <i>Flywheel</i> pada Frekuensi 0.9 Hz	62
Gambar 4.5 Voltase yang Dihasilkan Model Mekanisme <i>Salter Duck</i> pada Frekuensi 0.9 Hz	63
Gambar 4.6 Voltase yang Dihasilkan Model Mekanisme <i>Salter Duck</i> dengan <i>Flywheel</i> Diameter 7.5 cm	64
Gambar 4.7 Arus yang Dihasilkan Model Mekanisme <i>Salter Duck</i> pada Frekuensi 0.9 Hz	65
Gambar 4.8 Arus yang Dihasilkan Model Mekanisme <i>Salter Duck</i> dengan <i>Flywheel</i> Diameter 7.5 cm	67
Gambar 4.9 Daya yang Dihasilkan Model Mekanisme <i>Salter Duck</i> pada Frekuensi 0.9 Hz	68
Gambar 4.10 Daya yang Dihasilkan Model Mekanisme <i>Salter Duck</i> dengan <i>Flywheel</i> Diameter 7.5 cm	69
Gambar 4.11 Grafik Voltage rms dan Daya rms Hasil Simulasi <i>Salter Duck</i> tanpa maupun dengan Penambahan <i>Flywheel</i> pada Frekuensi 0.9 Hz	71

Gambar 4.12	Grafik Voltage rms dan Daya rms Hasil Simulasi <i>Salter Duck</i> dengan <i>Flywheel</i> Diameter 7.5 cm	72
Gambar 4.13	Grafik Perbandingan Voltage rms Hasil Studi Eksperimen dan Simulasi <i>Salter Duck</i>	74

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Hasil Pengujian Pengaruh Penambahan Beban	8
Tabel 2.2 Hasil Pengujian Pengaruh Ketinggian	8
Tabel 2.3 Energi Bangkitan yang Dihasilkan pada Variasi Frekuensi	10
Tabel 2.4 Klasifikasi Gelombang Berdasarkan Periode	12
Tabel 4.1 Parameter yang Digunakan dalam Penelitian	56
Tabel 4.2 Variasi <i>Input</i> yang Didapat dari Studi Eksperimen	58
Tabel 4.3 Energi Bangkitan rata-rata Hasil Studi Eksperimen dan Simulasi	70
Tabel 4.4 <i>Error</i> yang Dihasilkan dari Perbandingan Voltage rms Hasil Studi Eksperimen dan Simulasi	75

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi laut merupakan energi yang tidak akan habis, karena energi ini terbentuk oleh angin yang berhembus diatas permukaan laut, dan menyebabkan laut bergerak mengikuti arah angin tersebut. Secara umum energi laut dapat dibagi menjadi 3 potensi energi, yaitu:

1. Energi pasang surut (*tidal power*), merupakan energi yang dihasilkan dari pergerakan air laut akibat perbedaan pasang surut.
2. Energi gelombang laut (*wave energy*), adalah energi yang dihasilkan dari pergerakan gelombang laut menuju daratan dan sebaliknya.
3. Energi panas laut (*ocean thermal energy*), energi ini dihasilkan dari memanfaatkan perbedaan temperatur air laut di permukaan dan di kedalaman.

Indonesia merupakan negara kelautan terbesar di dunia. Luas laut Indonesia mencapai 5.8 juta km² atau mendekati 70% dari luas keseluruhan negara. Indonesia memiliki potensi alam yang melimpah, tidak hanya dari daratan melainkan juga dari perairannya. Indonesia yang memiliki luas lautan tiga kali lebih besar dari luas daratannya, mempunyai potensi sangat besar untuk mengembangkan energi ini tanpa menyebabkan efek rumah kaca. Wilayah perairan Indonesia memiliki arus laut yang kuat sehingga menyimpan potensi yang dapat dimanfaatkan secara maksimal untuk membangkitkan energi listrik tersebut. Namun sayangnya potensi pada perairan Indonesia ini belum banyak diketahui oleh masyarakat umum.

Dari ketiga potensi energi laut yang telah disebutkan di atas, dipilih energi gelombang laut sebagai tema penelitian tugas akhir ini karena merupakan teknologi yang paling siap untuk diterapkan pada laut Indonesia. Titik berat pada penelitian ini adalah memodelkan dan mensimulasikan mekanisme pemanfaatan

energi gelombang laut menjadi energi listrik dengan tipe *salter duck* sebagai *wave energy conversion* dalam skala laboratorium. Simulasi ini bekerja dari gaya yang berasal dari gelombang laut yang kemudian dikonversikan melalui bagian yang berbentuk *duck's tail* sehingga menghasilkan gerakan naik turun (*pitching*). Kemudian gerak naik turun itu akan diteruskan ke *gearbox* melalui rantai *sprocket*. *Gearbox* dihubungkan ke generator menggunakan induksi elektromagnetik sehingga menghasilkan energi listrik. Pada *gearbox* telah ditambahkan *flywheel* yang berfungsi sebagai penyimpan energi yang dihasilkan oleh putaran poros *gearbox* pada saat *nodding duck* bergerak turun, sehingga pada saat *nodding duck* bergerak naik, energi yang tersimpan pada *flywheel* akan didistribusikan ke poros *gearbox* yang terhubung ke generator.

1.2 Perumusan Masalah

Dari latar belakang diatas, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) dengan tipe *salter duck* sebagai alat pengkonversinya. Penelitian ini dititik beratkan pada desain pemodelan dan simulasi mekanisme PLTGL tipe *salter duck* dengan penambahan *flywheel*. Pada penelitian sebelumnya, gaya yang berasal dari gelombang laut yang kemudian dikonversikan melalui bagian yang berbentuk *duck's tail* sehingga menghasilkan gerakan naik turun (*pitching*). Kemudian gerak naik turun itu akan diteruskan ke *gearbox* melalui rantai *sprocket*. *Gearbox* dihubungkan ke generator menggunakan induksi elektromagnetik sehingga menghasilkan energi listrik. Pada *gearbox* telah ditambahkan *flywheel* yang berfungsi sebagai penyimpan energi yang dihasilkan oleh putaran poros *gearbox* pada saat *nodding duck* bergerak turun, sehingga pada saat *nodding duck* bergerak naik, energi yang tersimpan pada *flywheel* akan didistribusikan ke poros *gearbox* yang terhubung ke generator. Berdasarkan uraian diatas maka dapat disimpulkan bahwa permasalahan dari penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana analisa energi bangkitan dengan menggunakan simulasi akibat pengaruh penambahan *flywheel* pada model mekanisme PLTGL tipe *salter duck*?
2. Bagaimana pengaruh amplitudo dan frekuensi gelombang terhadap energi bangkitan dengan menggunakan simulasi yang dihasilkan mekanisme PLTGL tipe *salter duck*?
3. Bagaimana perbandingan energi bangkitan yang dihasilkan dari hasil studi eksperimen dengan hasil simulasi?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang terdapat dalam penelitian ini antara lain yaitu:

1. Pemodelan dan simulasi dalam skala laboratorium.
2. Instalasi *salter duck* di atas permukaan laut.
3. Eksitasi gelombang yang terbentuk merupakan eksitasi harmonik.
4. Gelombang air yang terjadi merupakan gelombang yang merambat ke satu arah vertikal.
5. Gelombang diasumsikan uniform dan searah.
6. Semua gesekan diperhitungkan.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui pengaruh penambahan *flywheel* terhadap energi bangkitan dengan menggunakan simulasi yang dihasilkan model mekanisme PLTGL tipe *salter duck*.
2. Mengetahui pengaruh amplitudo dan frekuensi gelombang terhadap energi bangkitan dengan menggunakan simulasi yang dihasilkan mekanisme PLTGL tipe *salter duck*.
3. Mengetahui perbandingan energi bangkitan yang dihasilkan dari hasil studi eksperimen dengan hasil simulasi.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat sebagai berikut:

1. Penelitian ini bermanfaat untuk mengetahui bagaimana energi bangkitan yang dihasilkan dari model mekanisme PLTGL tipe *salter duck* dengan penambahan *flywheel*, serta pengaruh variasi amplitudo dan frekuensi terhadap energi bangkitan yang dihasilkan.
2. Dari penelitian ini juga dapat dibandingkan bagaimana energi bangkitan yang dihasilkan dari hasil studi eksperimen dengan hasil simulasi.
3. Penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan referensi dalam penelitian selanjutnya untuk pengembangan maupun diterapkan di laut Indonesia sebagai salah satu energi alternatif yang terbarukan (*renewable resources*).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

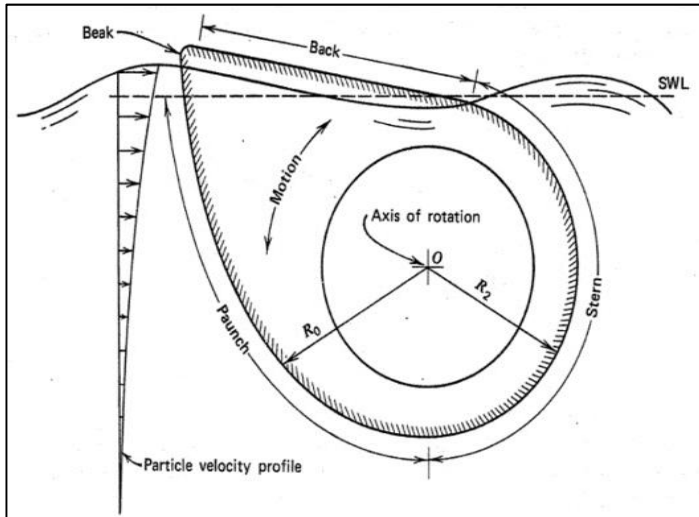
2.1.1 Penelitian Terdahulu Tentang Salter Duck

Telah banyak peneliti yang melakukan kajian terkait pembangkit listrik tenaga gelombang air laut (PLTGL). Berbagai macam bentuk-bentuk PLTGL telah dirancang mulai skala laboratorium sampai skala terapan. Hal tersebut terjadi karena manusia mulai menyadari bahwa pasokan energi yang bersumber dari minyak bumi dan mineral makin lama makin menipis, serta ditunjang dengan kadar emisi yang cukup tinggi sehingga dapat menimbulkan masalah kesehatan. Pada intinya penelitian-penelitian yang berhubungan dengan *Ocean Harvesting Energy* dilakukan guna mencari energi alternatif yang ramah lingkungan dan dapat diperbaharui (*renewable energy*).

Dari beberapa pembangkit listrik terbarukan yang ramah lingkungan, pembangkit listrik tenaga gelombang air laut diduga lebih ramah lingkungan dibandingkan pembangkit listrik tenaga angin dikarenakan pembangkit listrik ini tidak membawa pengaruh yang signifikan pada kehidupan biota laut. Sedangkan pembangkit listrik tenaga angin ditemukan telah mengakibatkan perubahan jalur migrasi burung, kelelawar, dan beberapa hewan lain di dikawasan Eropa. Di balik kelebihan tersebut, terdapat beberapa kelemahan energi gelombang air laut yaitu energi yang dihasilkan selalu bervariasi sebagai akibat gelombang dibangkitkan oleh angin (sebagian besar acak) yang selalu bervariasi dari bulan ke bulan, dan investasi awal untuk membangun pembangkit listrik tenaga air laut ini cukup mahal.

Salter duck merupakan salah satu dari sekian banyak mekanisme yang digunakan untuk *Ocean Wave Converter*. Stephen Salter adalah yang pertama kali memperkenalkannya pada tahun 1974. *Salter duck* ini mempunyai efisiensi mencapai 90% pada gelombang sinusoidal 2 dimensi. Dia menyebutnya dengan

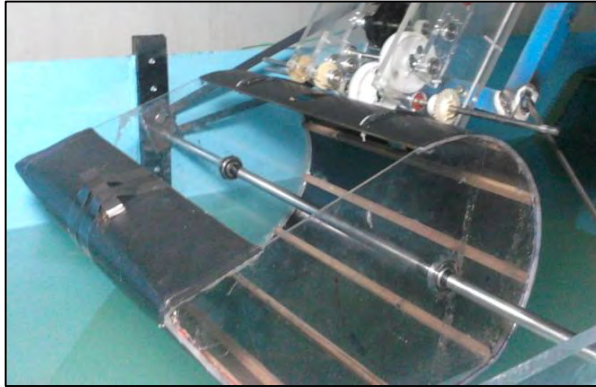
“*nodding duck*” berdasarkan bentuknya maupun operasinya, yang diilustrasikan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Nomenclature for The Nodding Duck Wave Converter
(Michael E. McCormick, 2010)

Michael McCormick dalam bukunya yang berjudul *Ocean Wave Energy Conversion* menyebutkan bahwa *paunch* dari perangkat tersebut sengaja dibentuk seperti itu dalam memanfaatkan tekanan dinamik yang disebabkan oleh gelombang yang akan mempengaruhi gerakan partikel dari air yang secara efisien akan memaksa perangkat tersebut untuk berotasi pada sumbu O. Sebagai tambahan, perubahan tekanan hidrostatik akan memberikan kontribusi untuk rotasinya dengan menyebabkan *bouyant forebody* dekat *beak* menjadi naik turun. Ketika kedua tekanan ini mempengaruhi pergerakan dari tiap fase, *nodding duck* mengkonversi dari energi kinetik dan potensial dari gelombang menjadi energi mekanik rotasi. Energi mekanik rotasi ini lalu dikonversi menjadi energi listrik. Analisis matematis dari operasi

perangkat ini dapat ditemukan dalam paper yang dibuat oleh Salter pada tahun 1976.



Gambar 2.2 *Prototype Salter Duck* Albi dan Yaqin
(Albi dan Yaqin, 2014)

Albi dan Yaqin (2014), melakukan penelitian untuk studi penelitian perancangan *prototype* pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem *salter duck*. Dalam penelitiannya, ia membuat *prototype salter duck* berskala laboratorium dengan desain ditambahkan variasi pemberat pada *beak salter* dan variasi ketinggian *salter* terhadap permukaan air, dapat dilihat pada gambar 2.2.

Dapat dilihat dari data hasil di bawah bahwa perbedaan jenis variasi dapat menyebabkan perbedaan hasil daya yang didapatkan, besarnya amplitudo gelombang dan berat variasi beban serta juga variasi ketinggian *salter* yang diberikan, mempengaruhi sistem kerja dari *salter duck* serta hasil keluaran daya. Mekanisme yang digunakan pada penelitian ini untuk mengkonversi gerakan *pitching* dari *nodding duck* sudah berhasil namun belum maksimal dikarenakan pada saat *nodding duck* naik, tidak ada transfer energi yang terjadi. Sehingga gaya rotasi akhir yang diubah oleh generator menjadi energi listrik juga kecil.

Tabel 2.1 Hasil Pengujian Pengaruh Penambahan Beban

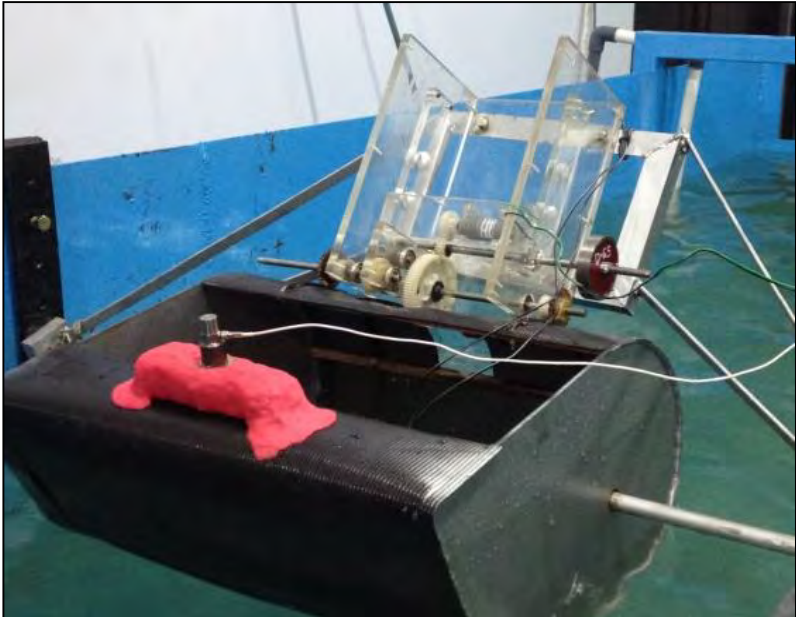
Amplitudo (m)	Beban (gr)	ENERGI BANGKITAN		
		Voltase rms (V)	Arus (A)	Daya (mWatt)
0.015	100	0.126	0.01	1.26
	200	0.126	0.014	1.768
	300	0.154	0.02	3.096
0.022	100	0.189	0.013	2.457
	200	0.233	0.016	3.728
	300	0.244	0.021	5.124
0.028	100	0.408	0.018	7.344
	200	0.578	0.026	15.028
	300	0.679	0.028	19.012

Tabel 2.2 Hasil Pengujian Pengaruh Ketinggian

Ketinggian salter terhadap permukaan air	A (mm)	ENERGI BANGKITAN		
		Voltase rms (V)	Arus (A)	Daya (mWatt)
0 mm	15,4	0.12801	0.010	1.28008
	22,9	0.21677	0.015	3.25154
	28,8	0.26561	0.020	5.31214
75 mm	15,4	0.18741	0.010	1.87409
	22,9	0.23786	0.015	3.56792
	28,8	0.28580	0.025	7.14493
150 mm	15,4	0.46965	0.020	9.39306
	22,9	0.57114	0.025	14.27840
	28,8	0.63307	0.025	15.82669

Akbar dan Amir (2015), melakukan penelitian untuk studi penelitian perancangan *prototype* PLTGL tipe *salter duck*. Dalam

penelitiannya, mereka membuat *prototype salter duck* berskala laboratorium dengan penambahan *flywheel* sebagai *energy storage* pada saat *nodding duck* bergerak naik, dapat dilihat pada gambar 2.3 di bawah.



Gambar 2.3 *Prototype Salter Duck* Akbar dan Amir
(Akbar dan Amir, 2015)

Penelitiannya bertujuan untuk mendesain dan merancang mekanisme prototype PLTGL tipe *salter duck* yang telah ditambahkan *flywheel*, serta mengetahui pengaruh diameter *flywheel solid* pada *salter duck* terhadap energi listrik yang dihasilkan mekanisme PLTGL tipe *salter duck* dengan variasi frekuensi gelombang air.

Tabel 2.3 Energi Bangkitan yang Dihasilkan pada Variasi Frekuensi

Diameter Flywheel (cm)	Frekuensi (Hz)	Energi Bangkitan		
		Vrms (V)	Arus (A)	Daya (mWatt)
6,5	0.7	0.1716	0.0006	0.099528
	0.8	0.2373	0.0005	0.109158
	0.9	0.3964	0.0003	0.134776
7	0.7	0.1793	0.0006	0.100408
	0.8	0.3071	0.0004	0.128982
	0.9	0.4515	0.0003	0.153510
7,5	0.7	0.1929	0.0005	0.104166
	0.8	0.3191	0.0005	0.149977
	0.9	0.578	0.0003	0.196520
Tanpa Flywheel	0.7	0.1673	0.00053	0.0887
	0.8	0.2101	0.00048	0.1009
	0.9	0.3117	0.00041	0.1309

Dapat dilihat pada tabel di atas bahwa penambahan *flywheel*, frekuensi gelombang, serta diameter *flywheel* yang diberikan, mempengaruhi sistem kerja dari *salter duck* serta hasil keluaran daya.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Gelombang Air Laut

Gelombang ombak merupakan pergerakan naik dan turunnya air dengan arah tegak lurus permukaan air laut yang membentuk kurva/grafik sinusoidal. Angin di atas lautan memindahkan tenaganya ke permukaan perairan, menyebabkan riak-riak, alunan/bukit, dan merubah menjadi apa yang disebut sebagai gelombang atau ombak.

Pemahaman mengenai keadaan fisik gelombang air laut sangat penting dibutuhkan untuk mendalami sistem pembangkit listrik tenaga gelombang air laut. Hal ini dikarenakan pada sistem pembangkit listrik tenaga air laut menggunakan gelombang air laut sebagai gaya eksitasi yang bekerja pada sistem.

Gelombang/ombak yang terjadi di lautan dapat diklasifikasikan menjadi beberapa macam tergantung dari gaya pembangkitnya. Pembangkit gelombang laut dapat disebabkan oleh hal-hal berikut: angin (gelombang angin), gaya tarik menarik bumi-bulan-matahari (gelombang pasang-surut), gempa (vulkanik atau tektonik) di dasar laut (gelombang tsunami), ataupun gelombang yang disebabkan oleh gerakan kapal.

Sebuah gelombang terdiri dari beberapa bagian, yaitu:

1. Puncak gelombang (*crest*) adalah titik tertinggi dari sebuah gelombang.
2. Lembah gelombang (*trough*) adalah titik terendah gelombang, diantara dua puncak gelombang.
3. Panjang gelombang (*wavelength*) adalah jarak mendatar antara dua puncak gelombang atau antara dua lembah gelombang.
4. Tinggi gelombang (*wave height*) adalah jarak tegak antara puncak dan lembah gelombang.
5. Periode gelombang (*wave period*) adalah waktu yang diperlukan oleh dua puncak gelombang yang berurutan untuk melalui satu titik.

Menurut Nontji (1987) antara panjang dan tinggi gelombang tidak ada satu hubungan yang pasti, akan tetapi gelombang mempunyai jarak antar dua puncak gelombang yang makin jauh akan mempunyai kemungkinan mencapai gelombang yang semakin tinggi. Pond dan Pickard (1983) mengklasifikasikan gelombang berdasarkan periodenya, seperti yang disajikan pada Tabel 2.4 berikut ini:

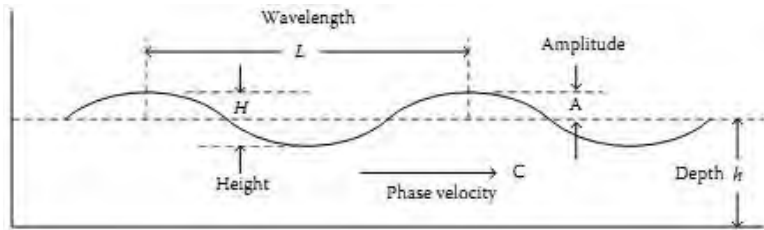
Tabel 2.4 Klasifikasi Gelombang Berdasarkan Periode

Periode	Panjang Gelombang	Jenis Gelombang
0 – 0,2 detik 0,2 – 0,9 detik	Beberapa centimeter Mencapai 130 meter	Riak (<i>Ripples</i>) Gelombang angin
0,9 -15 detik	Beberapa ratus meter	Gelombang besar (<i>Swell</i>)
15 – 30 detik 0,5 menit – 1 jam	Ribuan meter Ribuan kilometer	<i>Long Swell</i> Gelombang dengan periode panjang (termasuk Tsunami)
5, 12, 25 jam	Beberapa kilometer	Pasang surut

Bhatt (1978), Garisson (1993), dan Gross (1993) mengemukakan bahwa ada 4 bentuk besaran yang berkaitan dengan gelombang, yakni:

1. Amplitudo gelombang (A) adalah jarak antara puncak gelombang dengan permukaan rata-rata air.
2. Frekuensi gelombang (f) adalah sejumlah besar gelombang yang melintasi suatu titik dalam suatu waktu tertentu (biasanya didefinisikan dalam satuan detik).
3. Kecepatan gelombang (C) adalah jarak yang ditempuh gelombang dalam satu satuan waktu tertentu.
4. Kemiringan gelombang (H/L) adalah perbandingan antara tinggi gelombang dengan panjang gelombang.

Untuk tampilan 4 bentuk besaran yang berkaitan dengan gelombang dapat dilihat pada gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.4 Karakteristik Ombak
(Alireza Khaligh dan Omer C. Onar, 2009)

Keterangan dari beberapa notasi gambar 2.4 mengenai karakteristik ombak:

- h = jarak antara muka air rata dan dasar laut (kedalaman laut)
- A = amplitudo gelombang
- H = tinggi gelombang = $2A$
- λ atau L = panjang gelombang, jarak antara 2 puncak gelombang yang berurutan
- C = kecepatan rambat gelombang = λ / T

2.2.1.1 Analisa Gaya pada Gelombang Laut

Untuk mengetahui daya yang terdapat pada gelombang, untuk tahap awal harus mengetahui energi gelombang yang tersedia. Energi gelombang total adalah jumlah dari energi kinetik dan energi potensial. Total energi potensial dan energi kinetik dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E = \frac{1}{2} \rho g A^2 \quad (2.1)$$

dengan: g = percepatan gravitasi (9.81 m/s^2)

ρ = densitas air (1000 kg/m^3)

A = amplitudo gelombang (m)

Untuk mendapatkan rata-rata energi atau daya dari periode ombak, energi E dikalikan dengan kecepatan rambat gelombang, v_g .

$$v_g = \frac{L}{2T} \quad (2.2)$$

dengan keterangan T adalah periode gelombang (s) dan L adalah panjang gelombang (m):

$$P_w = \frac{1}{2} \rho g A^2 \frac{L}{2T} \quad (2.3)$$

Jika periode gelombang dan panjang dihubungkan, sehingga

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.4)$$

maka didapatkan:

$$P_w = \frac{\rho g^2 A^2 T}{8\pi} \quad (2.5)$$

Dengan menggunakan amplitudo gelombang, daya ombak dapat juga dituliskan sebagai fungsi tinggi gelombang, H , sehingga persamaannya menjadi

$$P_{wave} = \frac{\rho g^2 H^2 T b}{32\pi} \quad (2.6)$$

Dimana P_{wave} adalah daya gelombang (watt), ρ adalah massa jenis fluida (air tawar 1000 kg/m^3), g adalah percepatan gravitasi (9.8 m/s^2), H adalah tinggi gelombang (m), T adalah periode gelombang (s) dan b adalah lebar *salter duck* yang terkena gelombang (0.45 m).

Dari persamaan 2.6 diatas, dapat diketahui gaya ombak yang dikonversikan oleh mekanisme PLTGL sistem *Salter duck* ini adalah dengan rumusan sebagai berikut:

$$F_{wave} = \frac{P_{wave}}{c} \quad (2.7)$$

Dimana c merupakan setengah kecepatan rambat suatu gelombang (c) dengan persamaan:

$$c = \frac{\lambda}{T} \quad (2.8)$$

Keterangan: λ = panjang gelombang (m)
 T = periode gelombang (s)

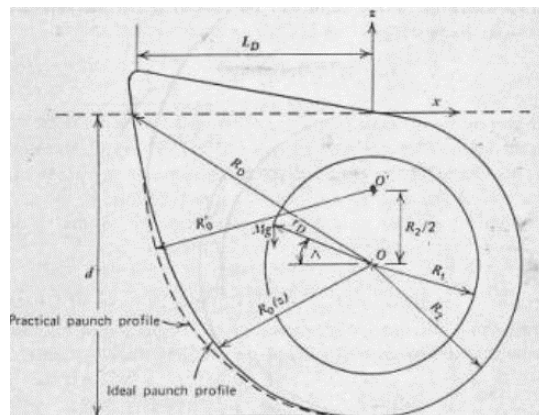
$$F_w = \frac{\rho g^2 H^2 T^2 b}{32\pi c} \quad (2.9)$$

Persamaan 2.8 disubstitusikan ke persamaan 2.9 maka didapatkan:

$$F_w = \frac{\rho g^2 H^2 T^2 b}{32\pi \lambda} \quad (2.10)$$

2.2.2 *Salter Duck*

Pada tahun 1974, Salter memperkenalkan suatu konsep pengkonversi energi yang cukup unik yang mampu menghasilkan efisiensi sebesar 90% pada gelombang sinusoidal 2 dimensi. Geometri *Salter duck* adalah sebagai berikut:



Gambar 2.5 Geometri *Salter Duck*
 (Luthfi Prasetya Kurniawan, 2014)

Dengan keterangan gambar sebagai berikut:

R_2 = Jari-jari *Stern*

R_0 = Jari-jari *Paunch*

R_0' = Jari-jari *Practical Paunch*

L_D = Panjang garis air

α = Sudut dari sumbu poros untuk R_0

r_D = Letak titik berat objek dari sumbu poros

Paunch dari objek adalah sebuah kurva melengkung yang mana merupakan sebuah kombinasi sederhana dari busur dan kurva tangen yang mungkin dapat digunakan untuk mencirikan dimana deviasi dari bentuk yang optimum dapat dipertimbangkan dan diterima.

2.2.2.1 Gaya yang Dihasilkan Untuk Menggerakkan *Duck*

Gaya yang dihasilkan ($F_{\text{generated}}$) merupakan resultan gaya yang dihasilkan untuk dapat menggerakkan *salter duck* dan pergerakan diteruskan ke poros utama untuk menggerakkan generator.

$$F_{\text{generated}} = (F_{\text{wave}} + F_{\text{buoyancy}}) - F_{\text{gravitasi}} \\ = \left[\left(\frac{P_{\text{wave}}}{c} \right) + (\rho \cdot g \cdot V_{\text{tercelup}}) \right] - (m \cdot g) \quad (2.11)$$

2.2.3 Mekanika Getaran

Secara umum getaran dapat didefinisikan sebagai gerakan bolak-balik suatu benda dari posisi awal melalui titik keseimbangan. Setiap komponen mekanikal memiliki berat dan properties yang menyerupai pegas, ada dua kelompok umum dari getaran, yaitu getaran bebas dan getaran paksa.

2.2.3.1 *Multidegree of Freedom* Sistem

Setiap struktur mempunyai derajat kebebasan (*degree of freedom*) yang tak terhingga jumlahnya, dan suatu struktur

mempunyai frekuensi natural sebanyak derajat kebebasan yang dimilikinya. Akan tetapi untuk menyederhanakan analisis dan perhitungan, maka struktur tersebut dianggap memiliki derajat kebebasan terbatas.

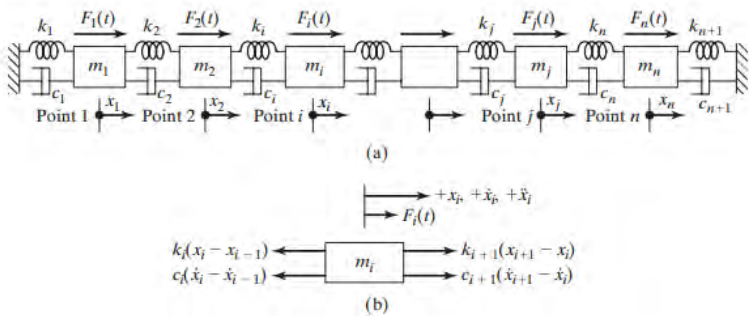
A. Equations of Motion of a Spring-Mass-Damper System

Untuk *free-body diagram* seperti pada gambar 2.8, dengan menggunakan hukum kedua Newton dapat ditulis persamaan geraknya sebagai berikut:

$$m_i \ddot{x}_i = -k_i(x_i - x_{i-1}) + k_{i+1}(x_{i+1} - x_i) - c_i(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) + c_{i+1}(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + F_i \quad i = 2, 3, \dots, n-1$$

or

$$m_i \ddot{x}_i - c_i \dot{x}_{i-1} + (c_i + c_{i+1}) \dot{x}_i - c_{i+1} \dot{x}_{i+1} - k_i x_{i-1} + (k_i + k_{i+1}) x_i - k_{i+1} x_{i+1} = F_i \quad i = 2, 3, \dots, n-1 \quad (2.12)$$



Gambar 2.6 *Spring-mass-damper System*
(Singiresu Rao, 2004)

Persamaan gerak dari massa m_1 dan m_n dapat diturunkan dari persamaan (2.12) dengan $i = 1$, $x_0 = 0$, dan $i = n$, serta $x_{n+1} = 0$, menjadi:

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 = F_1 \quad (2.13)$$

$$m_n \ddot{x}_n - c_n \dot{x}_{n-1} + (c_n + c_{n+1}) \dot{x}_n - k_n x_{n-1} + (k_n + k_{n+1})x_n = F_n \quad (2.14)$$

Ketiga persamaan di atas (2.12), (2.13), dan (2.14) dapat dimasukkan dalam bentuk matriks seperti berikut:

$$[m]\ddot{\vec{x}} + [c]\dot{\vec{x}} + [k]\vec{x} = \vec{F} \quad (2.15)$$

dimana $[m]$, $[c]$, dan $[k]$ masing-masing adalah matriks massa, matriks *damping*, dan matriks *stiffness*.

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & m_n \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$[c] = \begin{bmatrix} (c_1 + c_2) & -c_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -c_2 & (c_2 + c_3) & -c_3 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & (c_3 + c_4) & \cdots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -c_n & (c_n + c_{n+1}) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & (k_3 + k_4) & \cdots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -k_n & (k_n + k_{n+1}) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

dan \vec{x} , $\dot{\vec{x}}$, $\ddot{\vec{x}}$, \vec{F} masing-masing adalah vektor *displacement*, vektor *velocity*, vektor *acceleration*, dan vektor *force*.

$$\begin{aligned}
\vec{x} &= \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{Bmatrix}, & \dot{\vec{x}} &= \begin{Bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_n(t) \end{Bmatrix}, \\
\ddot{\vec{x}} &= \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \ddot{x}_n(t) \end{Bmatrix}, & \vec{F} &= \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ \vdots \\ F_n(t) \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Untuk sistem tanpa redaman, persamaan geraknya berkurang menjadi:

$$[m]\ddot{\vec{x}} + [k]\vec{x} = \vec{F} \tag{2.20}$$

Pada bentuk paling umum dari suatu sistem *spring-mass-damper*, matriks massa, matriks *damping*, dan matriks *stiffness* yaitu sebagai berikut:

$$[m] = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & \cdots & m_{1n} \\ m_{12} & m_{22} & m_{23} & \cdots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{1n} & m_{2n} & m_{3n} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix} \tag{2.21}$$

$$[c] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & \cdots & c_{1n} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{1n} & c_{2n} & c_{3n} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \tag{2.22}$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1n} \\ k_{12} & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{1n} & k_{2n} & k_{3n} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

2.2.3.2 Sistem Rotasi Mekanis

Untuk sistem rotasi, simbol yang digunakan sebagai parameter yaitu:

θ , perpindahan sudut [rad]

ω , kecepatan sudut [rad/s], dimana $\omega = \dot{\theta}$

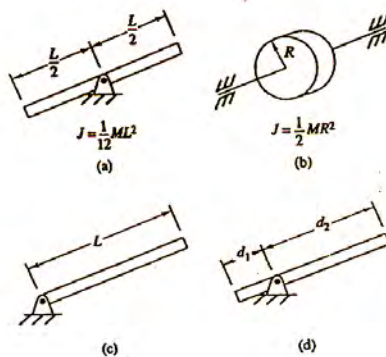
α , percepatan sudut [rad/s²], dimana $\alpha = \ddot{\theta}$

A. Momen Inersia

Momen inersia adalah hasil kali dari massa (m) dengan dengan kuadrat jarak dari titik rotasinya (L^2) dalam satuan [kg.m²], biasa disimbolkan dengan (J). Berikut adalah persamaan momen inersia dari batang dan poros.

$$J_{poros} = \frac{1}{2} m \cdot L^2 \quad (2.24)$$

$$J_{batang} = \frac{1}{12} m \cdot L^2 \quad (2.25)$$



Gambar 2.7 Momen Inersia Batang dan Poros
(Charles M.C., Dean K.F., dan Jonathon C.N., 2002)

Jika titik putarnya ada di ujung batang seperti pada gambar 2.8 (c), maka persamaan momen inersianya menjadi:

$$J_p = J_o + m \cdot a^2 \quad (2.26)$$

$$J_p = \frac{1}{12} m \cdot L^2 + m \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^2 \quad (2.27)$$

$$J_p = \frac{1}{3} m \cdot L^2 \quad (2.28)$$

B. Konstanta Damping Torsi

Gaya gesek yang diterima dari benda yang diputar, untuk menghitung damping torsi (B) adalah viskositas dikali luas permukaan kontak dibagi ketebalan viskositas fluida termasuk dalam jenis *viscous* damping. Berikut adalah persamaan damping torsi untuk bearing.

$$C = \frac{\mu \cdot A}{h} \quad (2.29)$$

dimana: C = konstanta damping torsi bearing [Nm/rad²]
 μ = viskositas oli [Pa.s], oli SAE 20, $\mu = 4500$ [cP] = 4,5 [Pa.s]
 A = Luas area kontak [m²]
 H = ketebalan oli [m] = 3.3 [mm]

C. Kekakuan Torsi Poros

Merupakan perkalian antara modulus elastisitas bahan dengan inersia poros dibagi panjang poros. Untuk mencari kekakuan torsi pada poros dapat menggunakan persamaan berikut:

$$k = \frac{G \cdot I}{L} \quad (2.30)$$

$$I = \frac{\pi}{32} \cdot d^4 \quad (2.31)$$

maka persamaannya menjadi

$$k = \frac{\pi \cdot G}{32 \cdot L} \cdot d^4 \quad (2.32)$$

Dimana: K = kekakuan torsi poros [Nm/rad]
 G = modulus young bahan poros [N/m²], bahan yang digunakan adalah alumunium, nilai $G = 68,9$ [GPa] = $68,9 \times 10^9$ [N/m²]
 d = diameter poros [m]
 L = panjang poros [m]

2.2.3.3 Frekuensi Natural

Sebagai bagian dari kebanyakan perangkat pengkonversi energi lainnya, analisis tentang perangkat ini dimulai dengan menetapkan desain dari gelombang yang mempengaruhi frekuensi natural dari sistem. Secara umum, persamaan frekuensi natural dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.33)$$

dimana *stiffness* (k) dari setiap poros dapat ditentukan menggunakan rumus (2.32).

2.2.4 Elemen Mesin

Dalam pembahasan elemen mesin ialah perancangan komponen-komponen mesin baik di tinjau dari segi keamanan, umur dan desain. Dalam elemen mesin banyak komponen yang akan dipelajari guna menciptakan sebuah mesin yang ideal walaupun terdapat keterbatasan-keterbatasan pada kenyataannya.

2.2.4.1 Roda Gigi

A. Roda Gigi Lurus (*Spur Gear*)

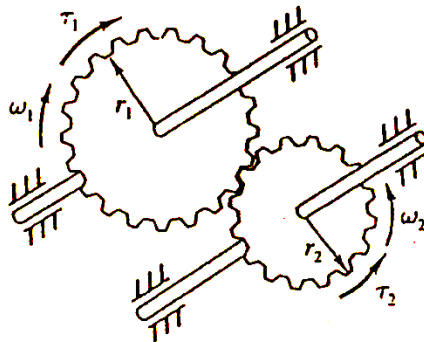
Roda gigi lurus merupakan jenis roda gigi yang paling banyak digunakan. Fungsi dari roda gigi lurus ini adalah untuk mentransmisikan daya dan gerak pada dua poros yang sejajar.

Bagian dari pasangan roda gigi yang berfungsi untuk menggerakkan roda gigi pasangannya disebut *pinion*. Sedangkan pasangan roda gigi yang digerakkan disebut *gear*.



Gambar 2.8 Roda Gigi Lurus

B. Roda Gigi Berpasangan

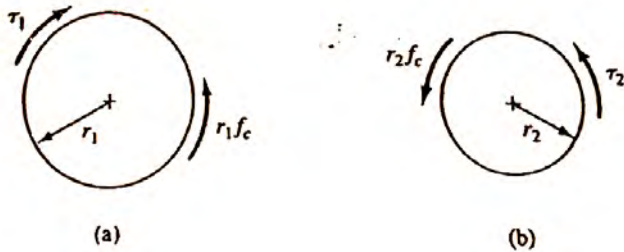


Gambar 2.9 Pasangan Roda Gigi
(Charles M.C., Dean K.F., dan Jonathan C.N., 2002)

Hubungan perpindahan sudut (θ) dan kecepatan sudut (ω) pada roda gigi berpasangan dapat ditulis dalam rasio roda gigi (N):

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1} = N$$

Free-body diagram dari roda gigi berpasangan dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.10 *Free-body diagram* Roda Gigi Berpasangan
(Charles M.C., Dean K.F., dan Jonathan C.N., 2002)

Torsi dari luar yang terjadi pada roda gigi disimbolkan dengan τ_1 dan τ_2 . Ada gaya kontak yang terjadi pada hubungan roda gigi yang disimbolkan fc . Dengan hukum gaya reaksi, maka arah fc itu berlawanan pada kedua roda gigi. Arah fc juga berlawanan dengan arah torsi input. Persamaan torsi setiap roda gigi dapat ditulis sebagai berikut (asumsi tidak tetap ada gaya inersia).

$$fc \cdot r_1 - \tau_1 = 0$$

$$fc \cdot r_2 + \tau_2 = 0$$

2.2.4.2 *Flywheel*

Flywheel adalah sebuah massa yang berputar, dan dipergunakan sebagai penyimpan tenaga di dalam mesin atau suatu mekanisme tertentu.

Energi disimpan secara mekanik di *flywheel* akibat adanya putaran dari porosnya. *Flywheel* dapat menyimpan energi dengan cara memutarkannya pada suatu tempat di mana gesekan yang terjadi relatif kecil. Untuk dapat menyimpan energi yang bermanfaat, poros *flywheel* harus berputar sangat cepat. Jika energi yang

tersimpan di *flywheel* akan digunakan, sebuah generator dapat mengubah energi mekanik tersebut menjadi energi listrik.



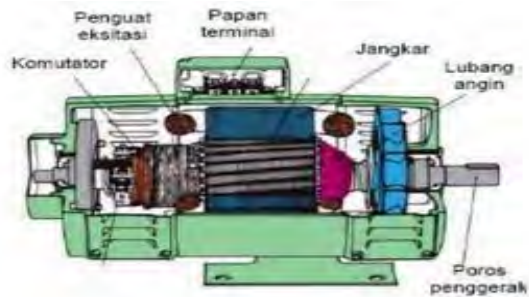
Gambar 2.11 *Flywheel*

Flywheel merupakan sebuah benda dengan berbagai macam bentuk yang berputar terhadap titik pusat massa. Pada umumnya *flywheel* berbentuk silinder pejal atau cakram yang memiliki massa dan jari-jari tertentu. Mekanisme penyimpanan energinya menggunakan prinsip gerak rotasi, energi disimpan dalam bentuk energi kinetik rotasi. Besarnya energi yang tersimpan pada *flywheel* tergantung pada momen inersia dan kecepatannya saat berputar, *flywheel* akan menyimpan energi saat berputar karena dikenai gaya dalam bentuk energi kinetik rotasi dan akan melepaskan energi tersebut saat gaya yang mengenainya berkurang atau dihilangkan. Sebuah *flywheel* bisa berputar sampai puluhan ribu RPM tergantung dari material yang menyusunnya, semakin padat dan keras material suatu *flywheel* semakin bagus karena dengan volume yang kecil massanya semakin besar dan selain itu juga akan semakin tahan jika diputar dengan kecepatan tinggi.

2.2.4.3 Generator

Generator listrik adalah alat yang memproduksi energi listrik dari sumber energi mekanik, biasanya dengan induksi elektromagnetik. Generator mendorong muatan listrik untuk bergerak melalui sebuah sirkuit listrik eksternal, tapi generator tidak menciptakan listrik yang sudah ada didalam kabel lilitannya.

Energi mekanik yang akan memutar generator berasal dari putaran *gearbox* yang diputar oleh gelombang laut.



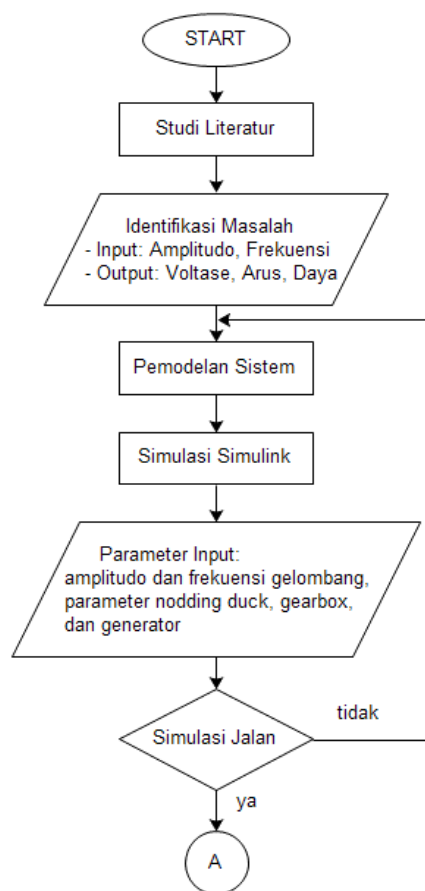
Gambar 2.12 Generator DC

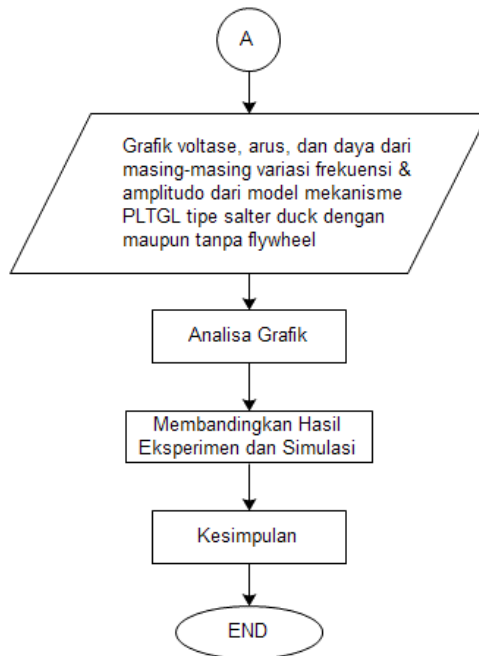
BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

3.1.1 Flowchart Penelitian

Untuk mencapai tujuan penelitian maka diperlukan langkah-langkah yang harus dilakukan sebagai berikut.





Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian Pemodelan dan Simulasi PLTGL Tipe *Salter Duck*

3.2 Penjelasan *Flowchart* Penelitian

Berikut ini adalah penjelasan dari *flowchart* penelitian pemodelan dan simulasi PLTGL tipe *salter duck*:

1. Studi Literatur

Langkah pertama yang dilakukan sebelum memodelkan PLTGL tipe *salter duck* dengan penambahan *flywheel* yaitu dengan melakukan studi menggunakan beberapa referensi dan literatur mengenai gelombang laut, *salter duck*, dan *flywheel*, kemudian mengumpulkan data-data yang relevan untuk menunjang penelitian. Studi literatur ini dilakukan agar penulis dapat mengetahui dasar-dasar mengenai penelitian ini berdasarkan dari

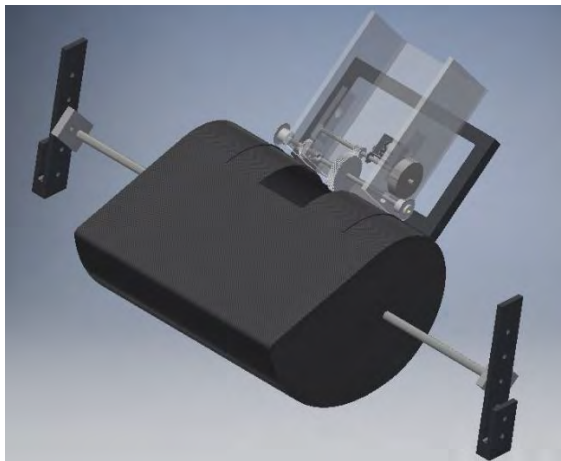
penelitian-penelitian terdahulu, dan juga menambah wawasan pengetahuan penulis mengenai PLTGL tipe *salter duck* dengan *flywheel*. Pada tahap studi literatur penulis melakukan kajian dan mengambil beberapa teori penunjang dari tugas akhir, artikel, jurnal ilmiah, textbook, dan penelitian terdahulu.

2. Identifikasi Masalah

Pada tahap ini dilakukan pengidentifikasian mengenai masalah dalam penelitian yang akan dilakukan. Identifikasi yang dilakukan adalah mengetahui kinerja dari simulasi mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) sistem *salter duck* dengan *flywheel* yang berfungsi sebagai *energy storage*. Dengan variasi input berupa amplitudo dan frekuensi dari gelombang air laut, penelitian yang dilakukan akan menghasilkan output berupa grafik yang merepresentasikan energi listrik dari simulasi PLTGL sistem *salter duck*.

3. Pemodelan Sistem

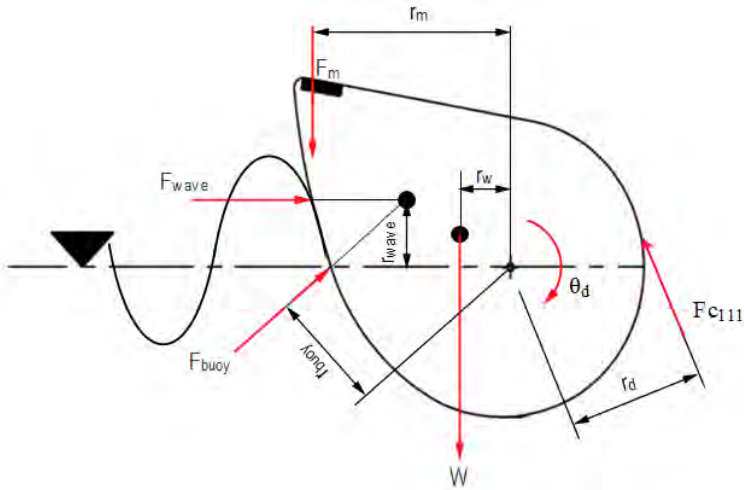
Berikut visualisasi model sederhana dari PLTGL tipe *salter duck* dengan penambahan *flywheel*.



Gambar 3.2 Model Mekanisme PLTGL Tipe *Salter Duck*

Prototype mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut tipe *salter duck* yang sebenarnya mempunyai bentuk yang lebih kompleks, sedangkan dalam penelitian ini hanya meneliti tentang pengaruh penambahan *flywheel* serta pengaruh dari amplitudo dan frekuensi gelombang air terhadap energi listrik yang dihasilkan sehingga model mekanismenya disederhanakan.

a. *Nodding duck*



Gambar 3.3 *Free-body Diagram Nodding Duck*

Dapat dilihat pada gambar di atas yaitu saat gelombang air mengenai *duck* sehingga persamaan gerakanya menjadi:

$$\Sigma M = I \cdot \alpha$$

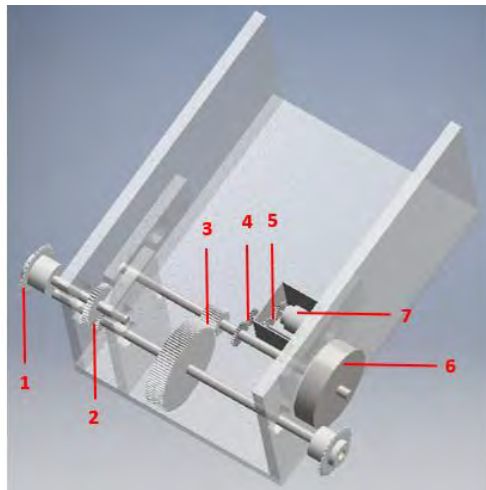
$$F_m \cdot \theta_d \cdot r_m + W \cdot \theta_d \cdot r_w - F_{buoy} \cdot r_{buoy} - F_{wave} \cdot r_{wave} - F_{c12} \cdot r_d = J_d \ddot{\theta}_d$$

$$F_m \cdot r_m \cdot \theta_d + W \cdot r_w \cdot \theta_d - F_{buoy} \cdot r_{buoy} - F_{wave} \cdot r_{wave} - J_d \ddot{\theta}_d = F_{c12} \cdot r_d \quad (3.1)$$

Pada penelitian ini diambil ketinggian sumbu rotasi terhadap permukaan air sebesar 150 mm, r_{buoy} terhadap sumbu rotasi sebesar 210 mm, dan r_{wave} terhadap sumbu rotasi sebesar 50 mm yang diukur pada studi eksperimen yang telah dilakukan sebelumnya yang bertujuan untuk memperkecil *error* yang didapat dari perbandingan energi bangkitan hasil studi eksperimen dan simulasi yang akan dibahas pada bab 4.

b. Gearbox

Pada rangkaian *gear* di bawah akan diuraikan *free-body diagram* satu per satu sesuai dengan urutan input (berurutan sesuai angka yang tertera). *Free-body diagram* tersebut digunakan untuk mendapatkan persamaan gerak yang nantinya akan dimasukkan ke simulink matlab. Rangkaian *gear* yang akan digunakan seperti pada gambar dibawah ini:



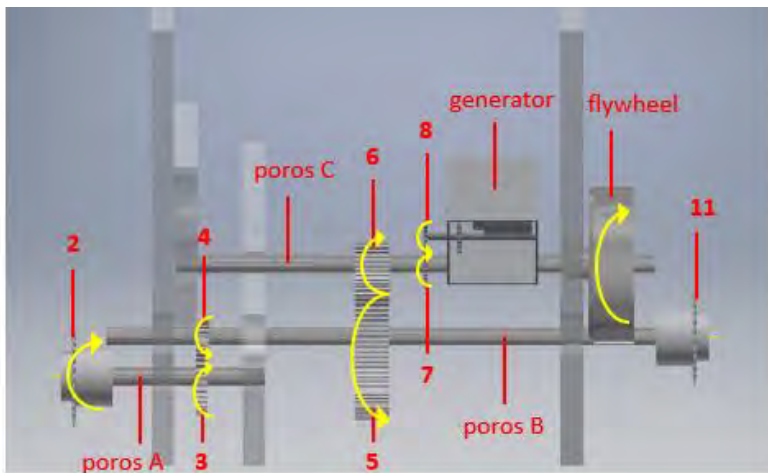
Gambar 3.4 Rancangan Gearbox

Keterangan: 1 = *sprocket one-way*
 2 = pasangan *spur gear* yang mendapat input dari *sprocket*

- 3 = pasangan *spur gear* yang mendapat input dari pasangan *spur gear* 2
- 4 = pasangan *spur gear* yang mendapat input dari pasangan *spur gear* 3
- 5 = pasangan *spur gear* input generator
- 6 = *flywheel*
- 7 = generator

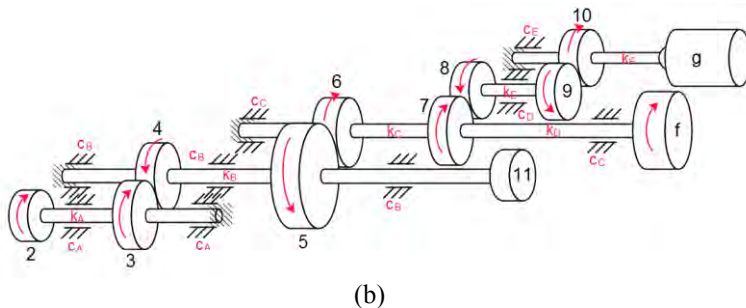
A. *Nodding Duck* Bergerak Turun

Saat *nodding duck* bergerak turun/CCW, maka putaran akan diteruskan dari *roller chain* 1 ke *sprocket* 2 dan *gear* 3 yang berputar CW pada poros 2. Lalu putaran itu diteruskan ke *gear* 4 dan 5 yang berputar CCW pada poros 4. *Gear* 6 yang memiliki kontak dengan *gear* 5 akan berputar CW dan meneruskan putaran itu ke *gear* 7 pada poros 6. Dari *gear* 7, putaran akan diteruskan ke *flywheel* yang berputar CW pada poros 6, dan ke *gear* 8 yang akan berputar CCW yang merupakan input bagi generator.



(a)

Gambar 3.5 (a) Gearbox saat *Nodding Duck* bergerak Turun, dan
 (b) Model Dinamis dari Gearbox saat *Nodding Duck* bergerak Turun



(b)
Gambar 3.5 (a) Gearbox saat *Nodding Duck* bergerak Turun, dan
(b) Model Dinamis dari Gearbox saat *Nodding Duck* bergerak Turun
(lanjutan)

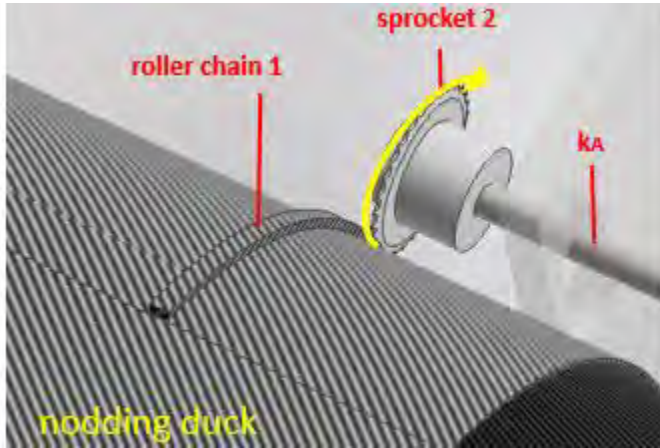
Keterangan: 1 = roller chain pada *nodding duck*
 2 = sprocket one-way arah turun
 3 = gear 3 yang mendapat input dari sprocket 2
 4 = gear 4 yang mendapat input dari gear 3
 5 = gear 5 yang mendapat input dari gear 4
 6 = gear 6 yang mendapat input dari gear 5
 7 = gear 7 yang mendapat input dari gear 6
 8 = gear 8 yang mendapat input dari gear 7
 9 = gear 9 yang mendapat input dari gear 8
 10 = gear 10 yang mendapat input dari gear 9
 11 = sprocket one-way arah naik

2) Sprocket one-way arah turun

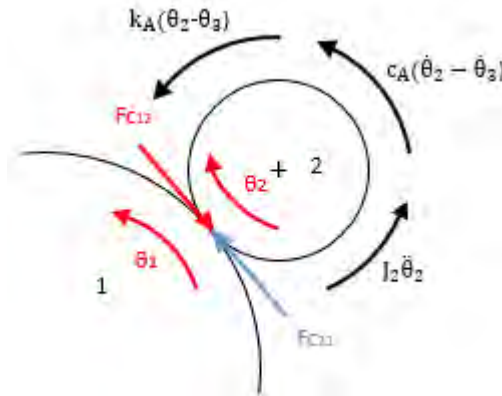
Dari *free-body diagram* sprocket 2 diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$J_2 \ddot{\theta}_2 + c_A (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3) + k_A (\theta_2 - \theta_3) = F c_{21} \cdot r_2 \quad (3.2)$$

dimana c_A adalah bearing yang digunakan dan k_A adalah jarak antara sprocket 2 dan gear 3 di poros A.



(a)



(b)

Gambar 3.6 (a) Roller chain 1 & sprocket 2, dan
(b) Free-body diagram dari roller chain 1 & sprocket 2

Dengan mensubstitusi persamaan (3.1) ke persamaan (3.2) maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$J_2 \ddot{\theta}_2 + c_A (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3) + k_A (\theta_2 - \theta_3) = \frac{r_2}{r_d} [F_m \cdot \theta_d \cdot r_m + W \cdot \theta_d \cdot r_w - F_{buoy} \cdot r_{buoy} - F_{wave} \cdot r_{wave} - J_d \ddot{\theta}_d] \quad (3.3)$$

Dari *gear ratio* diperoleh persamaan:

$$\begin{aligned}\frac{\theta_d}{\theta_2} &= \frac{r_2}{r_d} & \frac{r_2}{r_d} &= N_1 \\ \theta_d &= \frac{r_2}{r_d} \theta_2\end{aligned}$$

Substitusi persamaan yang didapat dari *gear ratio* ke persamaan (3.3), maka akan didapat persamaan DOF *nodding duck & sprocket 2*:

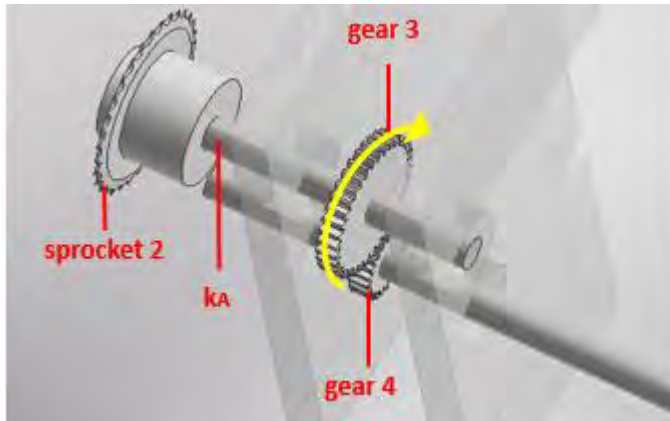
$$(J_2 + N_1^2 J_d) \ddot{\theta}_2 + c_A \dot{\theta}_2 + (k_A + F_{wave} \cdot r_{wave} + F_{buoy} \cdot r_{buoy} - N_1^2 F_m \cdot r_m - N_1^2 W \cdot r_w) \theta_2 - c_A \dot{\theta}_3 - k_A \theta_3 = 0 \quad (3.4)$$

dengan F_{wave} dan $F_{buoyancy}$ sebagai input untuk DOF 1.

3) Gear 3 yang mendapat input dari *sprocket 2*

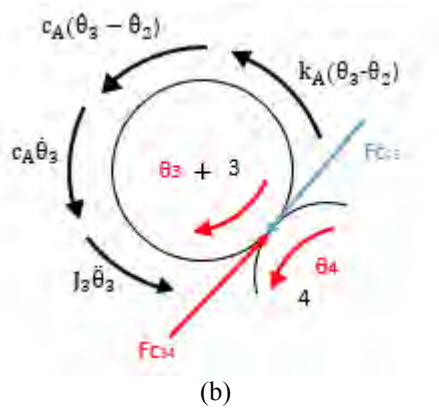
Dari *free-body diagram* gear 3 diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$J_3 \ddot{\theta}_3 + 2c_A \dot{\theta}_3 - c_A \dot{\theta}_2 + k_A (\theta_3 - \theta_2) + F_{c34} \cdot r_3 = 0 \quad (3.5)$$



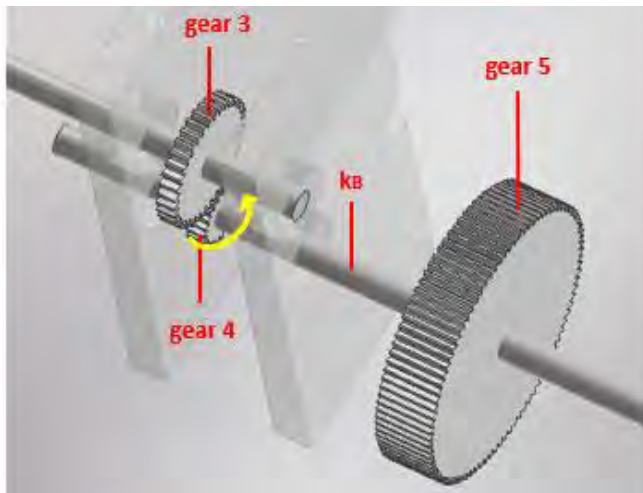
(a)

Gambar 3.7 (a) Gear 3, dan (b) *Free-body diagram* dari gear 3

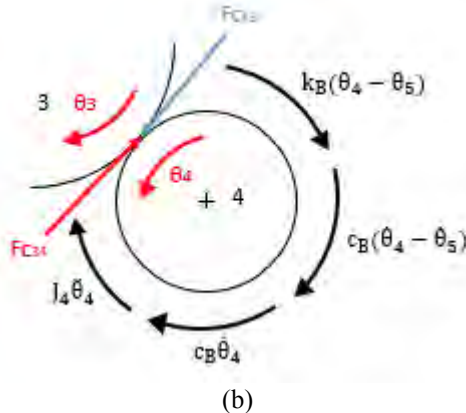


Gambar 3.7 (a) Gear 3, dan (b) Free-body diagram dari gear 3 (lanjutan)

4) Gear 4 yang mendapat input dari gear 3



Gambar 3.8 (a) Gear 4 dan (b) Free-body diagram dari gear 4



Gambar 3.8 (a) Gear 4 dan (b) Free-body diagram dari gear 4 (lanjutan)

Dari free-body diagram gear 4 di atas diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$J_4\ddot{\theta}_4 + 2c_B\dot{\theta}_4 - c_B\dot{\theta}_5 + k_B(\theta_4 - \theta_5) = F_{C_{43}} \cdot r_4 \quad (3.6)$$

dimana c_B adalah bearing yang digunakan dan k_B adalah jarak antara gear 4 dan gear 5 di poros B.

Dengan mensubstitusi persamaan (3.5) ke persamaan (3.6) maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$J_4\ddot{\theta}_4 + 2c_B\dot{\theta}_4 - c_B\dot{\theta}_5 + k_B(\theta_4 - \theta_5) = -\frac{r_4}{r_3} [J_3\ddot{\theta}_3 + 2c_A\dot{\theta}_3 - c_A\dot{\theta}_2 + k_A\theta_3 - k_A\theta_2] \quad (3.7)$$

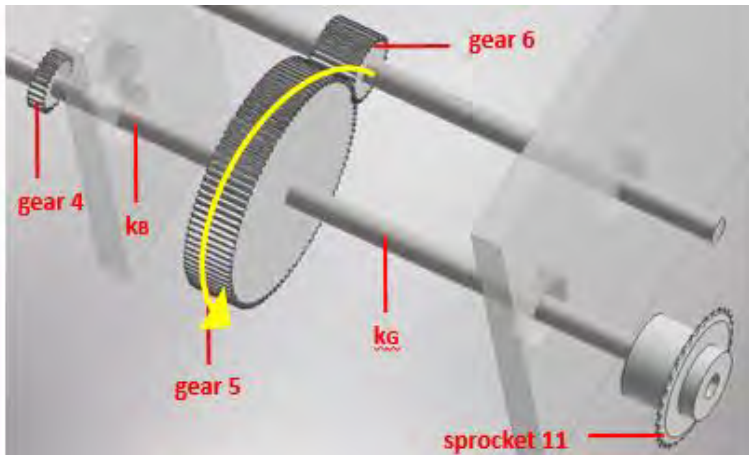
Dari gear ratio diperoleh persamaan:

$$\begin{aligned} \frac{\theta_3}{\theta_4} &= \frac{r_4}{r_3} & \frac{r_4}{r_3} &= N_2 \\ \theta_3 &= \frac{r_4}{r_3} \theta_4 \end{aligned}$$

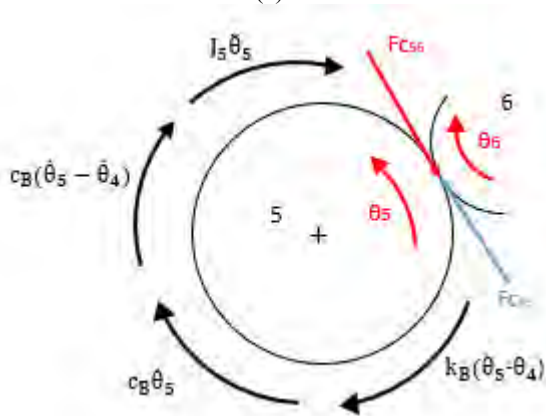
Substitusi persamaan yang didapat dari gear ratio ke persamaan (3.7), maka akan didapat persamaan DOF gear 3 & 4:

$$(J_4 + N_2^2 J_3) \ddot{\theta}_4 + (2c_B + 2N_2^2 c_A) \dot{\theta}_4 + (k_B + N_2^2 k_A) \theta_4 - c_B \dot{\theta}_5 - k_B \theta_5 - N_2 c_A \dot{\theta}_2 - N_2 k_A \theta_2 = 0 \quad (3.8)$$

5) Gear 5 yang mendapat input dari gear 4



(a)



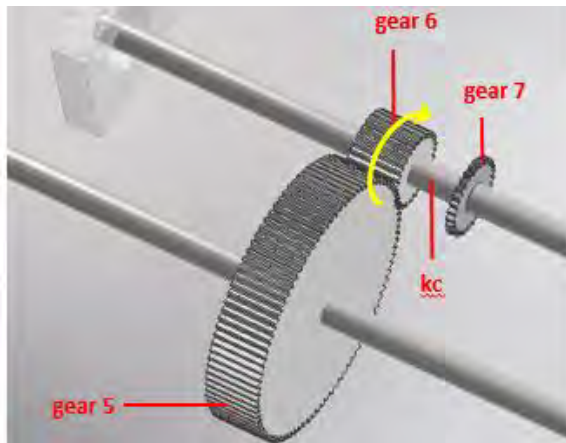
(b)

Gambar 3.9 (a) Gear 5, dan (b) Free-body diagram dari gear 5

Dari *free-body diagram gear 5* di atas diperoleh persamaan sebagai berikut:

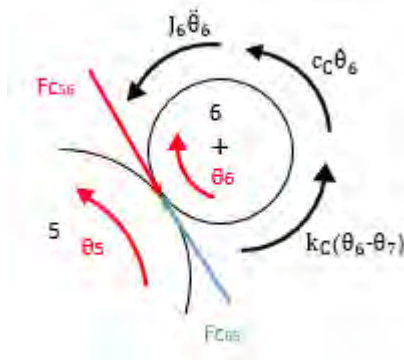
$$J_5 \ddot{\theta}_5 + 2c_B \dot{\theta}_5 - c_B \dot{\theta}_4 + k_B(\theta_5 - \theta_4) + Fc_{56} \cdot r_5 = 0 \quad (3.9)$$

6) Gear 6 yang mendapat input dari gear 5



(a)

Gambar 3.10 (a) Gear 6, dan (b) *Free-body diagram* dari gear 6



(b)

Gambar 3.10 (a) Gear 6, dan (b) *Free-body diagram* dari gear 6 (lanjutan)

Dari *free-body diagram gear 6* di atas diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$J_6 \ddot{\theta}_6 + c_c \dot{\theta}_6 + k_c (\theta_6 - \theta_7) = F c_{65} \cdot r_6 \quad (3.10)$$

dimana c_c adalah *bearing* dan k_c adalah jarak antara *gear 6* dan *gear 7* di poros C.

Dengan mensubstitusi persamaan (3.9) ke persamaan (3.10) maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$J_6 \ddot{\theta}_6 + c_c \dot{\theta}_6 + k_c (\theta_6 - \theta_7) = - \frac{r_6}{r_5} [J_5 \ddot{\theta}_5 + 2c_B \dot{\theta}_5 - c_B \dot{\theta}_4 + k_B (\theta_5 - \theta_4)] \quad (3.11)$$

Dari *gear ratio* diperoleh persamaan:

$$\begin{aligned} \frac{\theta_5}{\theta_6} &= \frac{r_6}{r_5} & \frac{r_6}{r_5} &= N_3 \\ \theta_5 &= \frac{r_6}{r_5} \theta_6 \end{aligned}$$

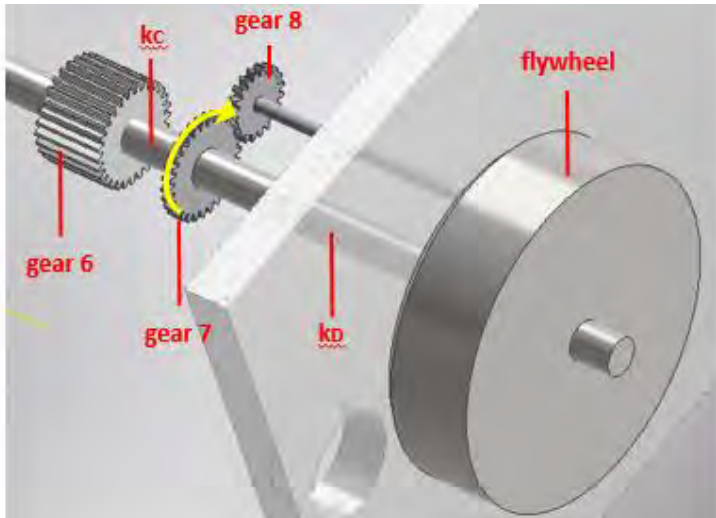
Lalu substitusi persamaan yang didapat dari *gear ratio* ke persamaan (3.11), maka didapat persamaan DOF *gear 5 & 6*:

$$(J_6 + N_3^2 J_5) \ddot{\theta}_6 + (c_c + N_3^2 2c_B) \dot{\theta}_6 + (k_c + N_3^2 k_B) \theta_6 - k_c \theta_7 - N_3 c_B \dot{\theta}_4 - N_3 k_B \theta_4 = 0 \quad (3.12)$$

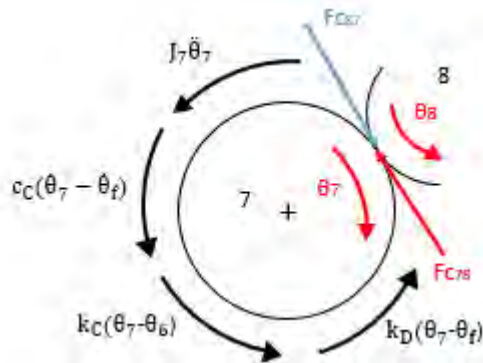
7) *Gear 7* yang mendapat input dari *gear 6*

Dari *free-body diagram gear 7* diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$J_7 \ddot{\theta}_7 + c_c (\dot{\theta}_7 - \dot{\theta}_f) + k_c (\theta_7 - \theta_6) + k_D (\theta_7 - \theta_f) + F c_{78} \cdot r_7 = 0 \quad (3.13)$$



(a)



(b)

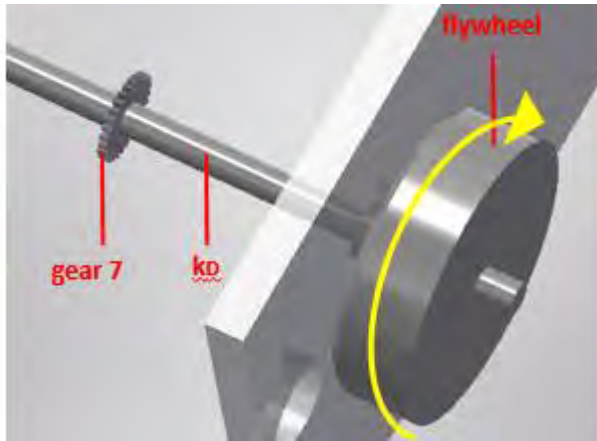
Gambar 3.11 (a) Gear 7 dan (b) Free-body diagram dari gear 7

c. Flywheel

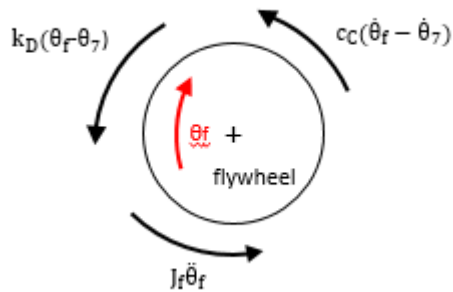
Dari *free-body diagram flywheel* diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$J_f \ddot{\theta}_f + c_c(\dot{\theta}_f - \dot{\theta}_7) + k_D(\theta_f - \theta_7) = 0 \quad (3.14)$$

dimana k_D adalah jarak antara *gear 6* dan *flywheel* di poros C.



(a)



(b)

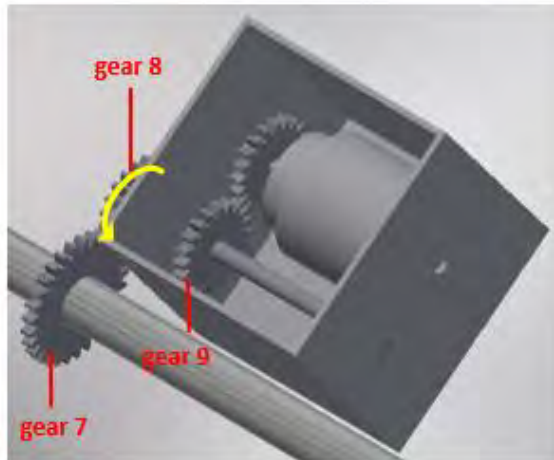
Gambar 3.12 (a) *Flywheel*, dan (b) *Free-body diagram* dari *flywheel* (lanjutan)

8) *Gear 8* yang mendapat input dari *gear 7*

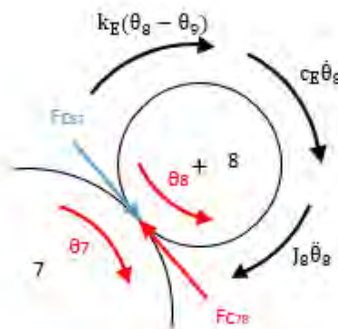
Dari *free-body diagram gear 8* diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$J_8 \ddot{\theta}_8 + c_E (\dot{\theta}_8 - \dot{\theta}_9) + k_E (\theta_8 - \theta_9) = F c_{87} \cdot r_8 \quad (3.15)$$

dimana c_E adalah *bearing* yang digunakan dan k_E adalah jarak antara gear 8 dan gear 9 di poros E.



(a)



(b)

Gambar 3.13 (a) Gear 8, dan (b) *Free-body diagram* dari gear 8 (lanjutan)

Dengan mensubstitusi persamaan (3.13) ke persamaan (3.15) maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$J_8 \ddot{\theta}_8 + c_E(\dot{\theta}_8 - \dot{\theta}_9) + k_E(\theta_8 - \theta_9) = -\frac{r_8}{r_7} [J_7 \ddot{\theta}_7 + c_C(\dot{\theta}_7 - \dot{\theta}_f) + k_C(\theta_7 - \theta_6) + k_D(\theta_7 - \theta_f)] \quad (3.16)$$

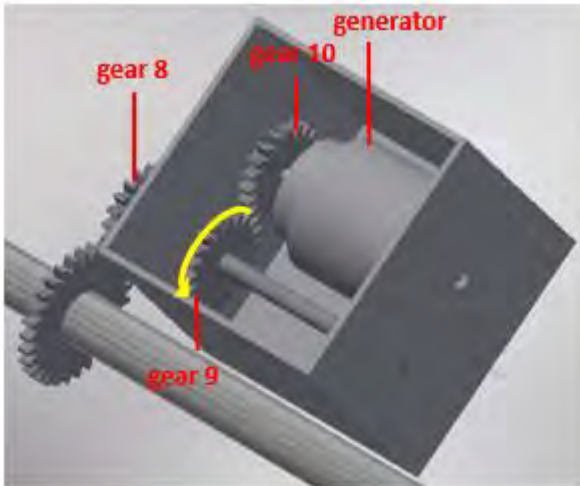
Dari *gear ratio* diperoleh persamaan:

$$\begin{aligned} \frac{\theta_7}{\theta_8} &= \frac{r_8}{r_7} & \frac{r_8}{r_7} &= N_4 \\ \theta_7 &= \frac{r_8}{r_7} \theta_8 \end{aligned}$$

Lalu substitusi persamaan yang didapat dari *gear ratio* ke persamaan (3.16), maka didapat persamaan DOF *gear 7 & 8*:

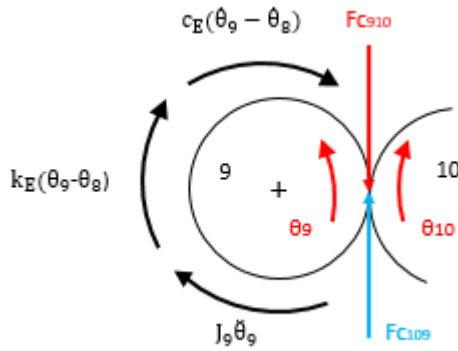
$$(J_8 + N_4^2 J_7) \ddot{\theta}_8 + (c_E + N_4^2 c_C) \dot{\theta}_8 + (k_E + N_4^2 k_C + N_4^2 k_D) \theta_8 - c_E \dot{\theta}_9 - k_E \theta_9 - N_4 c_C \dot{\theta}_f - N_4 k_C \theta_6 - N_4 k_D \theta_f = 0 \quad (3.17)$$

9) *Gear 9* yang mendapat input dari *gear 8*



(a)

Gambar 3.14 (a) *Gear 9* dan (b) *Free-body diagram* dari *gear 9*



(b)

Gambar 3.14 (a) Gear 9 dan (b) Free-body diagram dari gear 9 (lanjutan)

Dari *free-body diagram* gear 9 di atas diperoleh persamaan sebagai berikut:

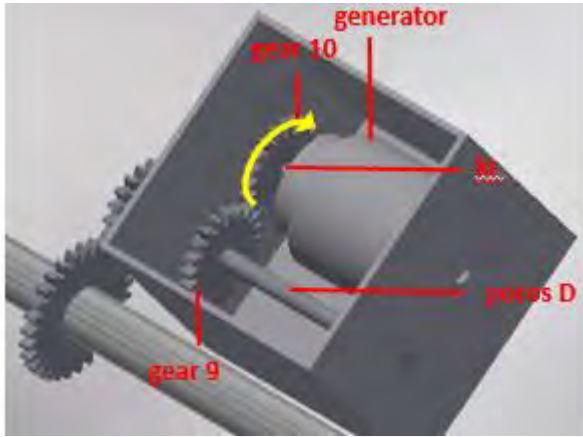
$$J_9 \ddot{\theta}_9 + c_E(\dot{\theta}_9 - \dot{\theta}_8) + k_E(\theta_9 - \theta_8) + F_{C910} \cdot r_9 = 0 \quad (3.18)$$

10) Gear 10 yang mendapat input dari gear 9

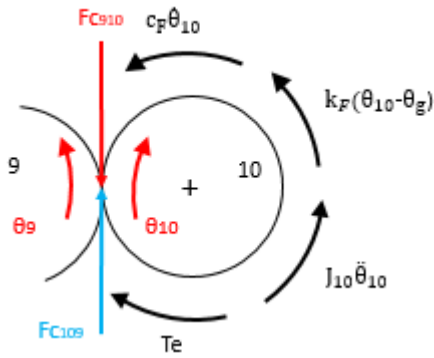
Dari *free-body diagram* gear 10 diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$J_{10} \ddot{\theta}_{10} + c_F \dot{\theta}_{10} + k_F(\theta_{10} - \theta_g) - T_e = F_{C109} \cdot r_{10} \quad (3.19)$$

dimana c_F adalah *bearing* yang digunakan dan k_F adalah jarak antara gear 10 dan generator di poros F.



(a)



(b)

Gambar 3.15 (a) Gear 10 dan (b) Free-body diagram dari gear 10

Dengan mensubstitusi persamaan (3.18) ke persamaan (3.19) maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$J_{10}\ddot{\theta}_{10} + c_F\dot{\theta}_{10} + k_F(\theta_{10} - \theta_g) - Te = -\frac{r_{10}}{r_9}[J_9\ddot{\theta}_9 + c_E(\dot{\theta}_9 - \dot{\theta}_8) + k_E(\theta_9 - \theta_8)] \quad (3.20)$$

Dari *gear ratio* diperoleh persamaan:

$$\frac{\theta_9}{\theta_{10}} = \frac{r_{10}}{r_9} \quad \frac{r_{10}}{r_9} = N_5$$

$$\theta_9 = \frac{r_{10}}{r_9} \theta_{10}$$

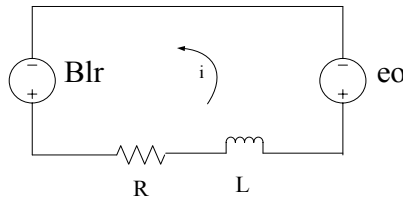
Lalu substitusi persamaan yang didapat dari *gear ratio* ke persamaan (3.20), maka didapat persamaan DOF *gear 9 & 10*:

$$(J_{10} + N_5^2 J_9) \ddot{\theta}_{10} + (c_F + N_5^2 c_E) \dot{\theta}_{10} + (k_F + N_5^2 k_E) \theta_{10} - k_F \theta_g - N_5 c_E \dot{\theta}_8 - N_5 k_E \theta_8 - Te = 0 \quad (3.21)$$

dimana: $Te = 2NBlr \cdot i$

$$i = \dot{\theta}_g$$

Te yang didapat dari persamaan mekanis ini akan dimasukkan ke dalam persamaan listrik generator. Generator yang digunakan yaitu DC motor 8224 dengan kapasitas 12 V.



Gambar 3.16 Diagram Sirkuit Elektromagnetik dari Generator

Persamaan listrik pada generator yaitu sebagai berikut:

$$L \frac{di}{dt} + R \cdot i + eo = e(t) \quad (3.22)$$

dimana: $e(t) = Te$

N = jumlah lilitan

B = kuat medan magnet (Ns/m)

r = jari-jari lilitan

l = panjang lilitan (m)

R = hambatan total generator (ohm)

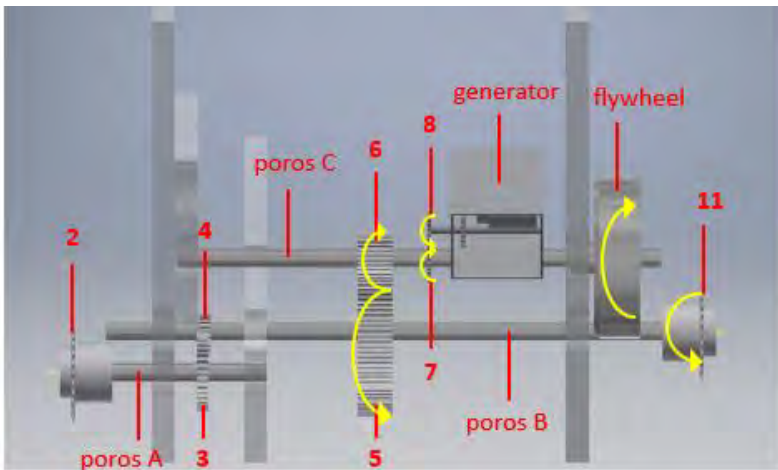
L = induktansi listrik generator (H)

Maka persamaannya menjadi:

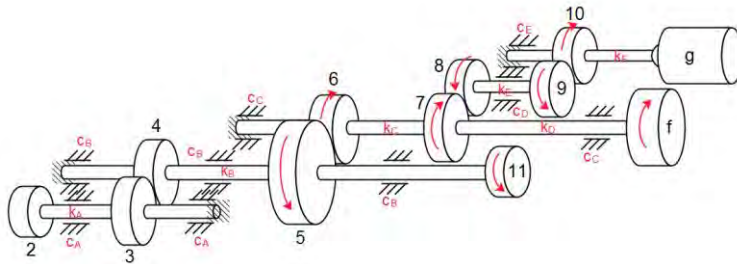
$$L \frac{di}{dt} + R \cdot i + eo = 2NB l r \cdot i$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} [-R \cdot i + 2NB l r \cdot \dot{\theta}_G] \quad (3.23)$$

B. Nodding Duck Bergerak Naik



(a)



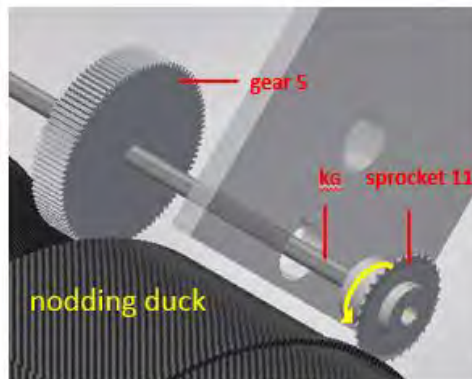
(b)

Gambar 3.17 (a) Gearbox saat Nodding Duck Bergerak Naik
(b) Model Dinamis dari Gearbox saat Nodding Duck bergerak Naik

Keterangan: 1 = *roller chain* pada *nodding duck*
 2 = *sprocket one-way* arah turun
 3 = *gear 3* yang mendapat input dari *sprocket 2*
 4 = *gear 4* yang mendapat input dari *gear 3*
 5 = *gear 5* yang mendapat input dari *gear 4*
 6 = *gear 6* yang mendapat input dari *gear 5*
 7 = *gear 7* yang mendapat input dari *gear 6*
 8 = *gear 8* yang mendapat input dari *gear 7*
 9 = *gear 9* yang mendapat input dari *gear 8*
 10 = *gear 10* yang mendapat input dari *gear 9*
 11 = *sprocket one-way* arah naik

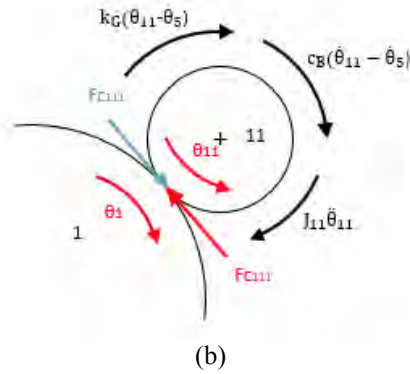
Saat *nodding duck* bergerak naik/CW, *flywheel* yang masih memiliki kecepatan sisa akan berputar CW pada poros 6. Lalu putaran itu diteruskan ke *gear 7* yang berada pada poros yang sama. Gear 8 yang memiliki kontak dengan *gear 7* akan berputar CCW dan menjadi input bagi generator.

11) *Sprocket one-way* arah naik



(a)

Gambar 3.18 (a) *Roller chain 1 & sprocket 11*, dan (b) *Free-body diagram* dari *roller chain 1 & sprocket 11*



Gambar 3.18 (a) Roller chain 1 & sprocket 11, dan (b) Free-body diagram dari roller chain 1 & sprocket 11 (lanjutan)

Dari *free-body diagram sprocket 11* diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$J_{11}\ddot{\theta}_{11} + c_B(\dot{\theta}_{11} - \dot{\theta}_5) + k_G(\theta_{11} - \theta_5) = F_{c111} \cdot r_{11} \quad (3.24)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (3.1) ke persamaan (3.24) maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$J_{11}\ddot{\theta}_{11} + c_B(\dot{\theta}_{11} - \dot{\theta}_5) + k_G(\theta_{11} - \theta_5) = -\frac{r_{11}}{r_d} [F_m \cdot r_m \cdot \theta_d + W \cdot r_w \cdot \theta_d - F_{buoy} \cdot r_{buoy} - F_{wave} \cdot r_{wave} - J_d \ddot{\theta}_d] \quad (3.25)$$

Dari *gear ratio* diperoleh persamaan:

$$\begin{aligned} \frac{\theta_d}{\theta_{11}} &= \frac{r_{11}}{r_d} & \frac{r_{11}}{r_d} &= N_1 \\ \theta_d &= \frac{r_{11}}{r_d} \theta_{11} \end{aligned}$$

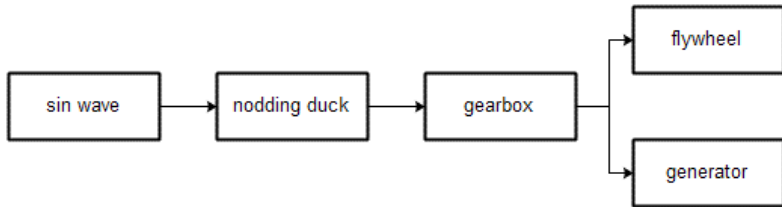
Lalu substitusi persamaan yang didapat dari *gear ratio* ke persamaan (3.25), maka didapat persamaan DOF *nodding duck & sprocket 11*:

$$(J_{11} - N_1^2 J_d) \ddot{\theta}_{11} + c_B \dot{\theta}_{11} + (k_G - F_{wave} \cdot r_{wave} - F_{buoy} \cdot r_{buoy} + N_1^2 F_m \cdot r_m + N_1^2 W \cdot r_w) \theta_{11} - c_B \dot{\theta}_5 - k_G \theta_5 = 0 \quad (3.26)$$

dengan F_{wave} dan $F_{buoyancy}$ sebagai input untuk DOF 8.

4. Simulasi Simulink

Pada simulasi yang dilakukan dengan menggunakan Simulink matlab terdiri dari 5 subsistem seperti pada gambar di bawah ini:



Pada rangkaian subsistem di atas terdapat input pada *nodding duck* yaitu amplitudo & frekuensi gelombang air dimana output yang diperoleh nantinya yaitu theta *nodding duck* yang menjadi input pada *gearbox*. Pada *gearbox* menghasilkan theta *gearbox* yang akan menjadi input pada *flywheel*. Theta *flywheel* merupakan output dari *flywheel* yang menjadi input pada *generator*. Dengan menggunakan Simulink didapatkan voltase dan diolah menjadi energi listrik berupa daya.

5. Input Parameter

Pada tahap ini dimasukkan seluruh parameter-parameter yang dibutuhkan dalam proses simulasi menggunakan Simulink Matlab.

6. Simulasi Jalan

Pada pemodelan digunakan *state variable* sebagai berikut:

State variable pada DOF 1 (*duck 1 & sprocket 2*):

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{1}{(J_2 + N_1^2 J_d)} [-c_A \dot{\theta}_2 - (k_A - N_1^2 F_m \cdot r_m - N_1^2 W \cdot r_w) \theta_2 + c_A \dot{\theta}_3 + k_A \theta_3]$$

State variable pada DOF 2 (*gear 3 & 4*):

$$\ddot{\theta}_4 = \frac{1}{(J_4 + N_2^2 J_3)} [-(2c_B + 2N_2^2 c_A) \dot{\theta}_4 - (k_B + N_2^2 k_A) \theta_4 + c_B \dot{\theta}_5 + k_B \theta_5 + N_2 c_A \dot{\theta}_2 + N_2 k_A \theta_2]$$

State variable pada DOF 3 (*gear 5 & 6*):

$$\ddot{\theta}_6 = \frac{1}{(J_6 + N_3^2 J_5)} [-(c_C + 2N_3^2 c_B) \dot{\theta}_6 - (k_C + N_3^2 k_B) \theta_6 + k_C \theta_7 + N_3 c_B \dot{\theta}_4 + N_3 k_B \theta_4]$$

State variable pada DOF 4 (*gear 7 & 8*):

$$\ddot{\theta}_8 = \frac{1}{(J_8 + N_4^2 J_7)} [-(c_E + N_4^2 c_C) \dot{\theta}_8 - (k_E + N_4^2 k_C + N_4^2 k_D) \theta_8 + c_E \dot{\theta}_9 + k_E \theta_9 + N_4 k_C \theta_6 + N_4 c_C \dot{\theta}_f + N_4 k_D \theta_f]$$

State variable pada DOF 5 (*gear 9 & 10*):

$$\ddot{\theta}_{10} = \frac{1}{(J_{10} + N_5^2 J_9)} [-(c_F + N_5^2 c_E) \dot{\theta}_{10} - (k_F + N_5^2 k_E) \theta_{10} + k_F \theta_g + N_5 c_E \dot{\theta}_8 + N_5 k_E \theta_8 + T e]$$

State variable pada DOF 6 (*flywheel*):

$$\ddot{\theta}_f = \frac{1}{J_f} [-c_C \dot{\theta}_f - k_D \theta_f + c_C \dot{\theta}_7 + k_D \theta_7]$$

State variable pada DOF 8 (*duck 1 & sprocket 11*):

$$\ddot{\theta}_{11} = \frac{1}{(J_{11} - N_1^2 J_d)} [-c_B \dot{\theta}_{11} - (k_G + N_1^2 F_m \cdot r_m + N_1^2 W \cdot r_w) \theta_{11} + c_B \dot{\theta}_5 + k_G \theta_5]$$

Setelah melakukan pemodelan dan simulasi pada Simulink, dilakukan running dari simulasi yang telah dibuat, baik tanpa *flywheel* maupun yang telah ditambahkan *flywheel*. Jika simulasi sudah berjalan tanpa ada kesalahan dilanjutkan dengan variasi amplitudo dan frekuensi gelombang air. Namun jika pada simulasi masih terdapat kesalahan dan belum bisa di running maka dilakukan pemodelan ulang.

7. Analisa Grafik

Pada grafik yang telah didapat pada simulasi, dilakukan analisa grafik apakah energi listrik yang dihasilkan dengan input berupa frekuensi sesuai dengan eksperimen yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya, baik pada model mekanisme *salter duck* tanpa *flywheel* maupun yang telah ditambahkan *flywheel*. Setelah itu dilakukan penambahan variasi frekuensi dan amplitudo gelombang air untuk mengetahui bagaimana energi listrik yang dihasilkan dan kembali menganalisa grafik yang terbentuk.

8. Validasi Hasil Studi Eksperimen dan Simulasi

Setelah menganalisa grafik yang terbentuk dari simulasi menggunakan Simulink, lalu dilakukan validasi antara hasil yang didapat dari studi eksperimen dan simulasi.

9. Penarikan Kesimpulan

Dari hasil analisa grafik yang terbentuk dan validasi antara studi eksperimen dan simulasi maka dapat ditarik kesimpulan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

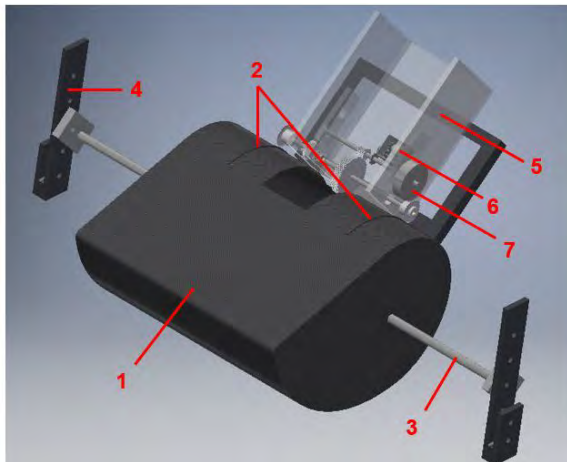
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dianalisa dan dibahas energi bangkitan berupa voltase, arus, dan daya yang dihasilkan oleh PLTGL tipe *Salter Duck*, baik dengan maupun tanpa penambahan *flywheel*. Penelitian ini dilakukan dengan melakukan simulasi menggunakan *software* Simulink Matlab 2014a.

4.1 Mekanisme Alat dan Parameter yang Digunakan

Pada subbab ini akan digambarkan bagaimana mekanisme PLTGL tipe *salter duck* dengan penambahan *flywheel* beserta data parameter yang digunakan pada proses simulasi model mekanisme.

4.1.1 Mekanisme Alat



Gambar 4.1 Model Mekanisme PLTGL tipe *Salter Duck*

Keterangan: 1 = *Nodding Duck*

- 2 = *Roller Chain*
- 3 = Poros 1
- 4 = Pengatur ketinggian
- 5 = *Gearbox*
- 6 = Generator
- 7 = *Flywheel*

Gambar di atas adalah model dari mekanisme PLTGL tipe Salter Duck. Cara kerjanya yaitu gaya yang berasal dari gelombang air laut dikonversikan melalui bagian yang berbentuk *duck's tail* sehingga menghasilkan gerakan naik turun (*pitching*). Kemudian gerak naik turun itu akan diteruskan ke *gearbox* melalui rantai *sprocket*. *Gearbox* dihubungkan ke generator menggunakan induksi elektromagnetik sehingga menghasilkan energi listrik. Pada *gearbox* telah ditambahkan *flywheel* yang berfungsi sebagai penyimpan energi yang dihasilkan oleh putaran poros *gearbox* pada saat *nodding duck* bergerak turun, sehingga pada saat *nodding duck* bergerak naik, energi yang tersimpan pada *flywheel* akan didistribusikan ke poros *gearbox* yang terhubung ke generator.

4.1.2 Parameter yang Digunakan pada Simulasi

Untuk parameter yang digunakan pada proses simulasi model mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut tipe *salter duck* dapat dilihat pada tabel 4.1 di bawah.

Tabel 4.1 Parameter yang Digunakan dalam Penelitian

No	Parameter		Nilai
1	Gelombang	ρ air	1000 kg/m ³
2	Duck	inertia duck (J_d)	40267 kg mm ²
		massa duck (m_d)	2 kg
		massa tambahan (m_m)	0.3 kg
		lebar duck (b)	0.450 m
		panjang garis air (L_D)	0.168 m

Tabel 4.1 Parameter yang Digunakan dalam Penelitian (lanjutan)

No	Parameter		Nilai
2	Duck	titik berat objek (r_D)	0.225 m
		jari-jari stern (R_2)	0.150 m
		sudut sumbu poros (α)	41.69°
		Vtercelup	0.44808 cm ³
		r_{wave}	0.050 m
		r_{buoy}	0.210 m
		r_{weight}	0.059 m
		r_{massa}	0.213 m
		$r_d = R_2$	0.150 m
3	Poros	diameter poros (d_A, d_B, d_C)	8 mm
		(d_E)	3 mm
		(d_F)	2 mm
4	Gearbox	inertia body 2, 11 (J_2, J_{11})	1.381 kg mm ²
		inertia body 3 (J_3)	0.551 kg mm ²
		inertia body 4 (J_4)	0.040 kg mm ²
		inertia body 5 (J_5)	40.216 kg mm ²
		inertia body 6, 7 (J_6, J_7)	0.256 kg mm ²
		inertia body 8, 9, 10 (J_8, J_9, J_{10})	0.060 kg mm ²
		rasio body 1 & 2 (N_1)	0.25
		rasio body 3 & 4 (N_2)	0.5
		rasio body 5 & 6 (N_3)	0.3
		rasio body 7 & 8 (N_4)	0.7
		rasio body 9 & 10 (N_5)	1
5	Bearing	viskositas oli (μ)	4.5 Pa s
		lebar bearing (lb_A, lb_B, lb_C)	2.6 mm
		(lb_E)	1.6 mm
		(lb_F)	1.4 mm
		ketebalan oli (h)	3.3 mm
6	Flywheel	inertia (J_f)	263.262 kg mm ²
			339.042 kg mm ²
			422.853 kg mm ²

Tabel 4.1 Parameter yang Digunakan dalam Penelitian (lanjutan)

No	Parameter		Nilai
7	Generator	inertia rotor (J_g)	1.62 kg mm ²
		viscous damping factor (b_g)	1.34×10^{-6} N m s
		voltage constant (K_e)	0.011 V/rad/s
		torque constant (K_t)	0.011 N m/Amp
		resistance (R)	1.17 Ohm
		inductance (L)	0.58×10^{-6} H

4.2 Analisa

Pada subbab ini akan dilakukan analisa energi bangkitan yang dihasilkan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut tipe *Salter Duck* dari masing-masing variasi.

4.2.1 Karakteristik Gelombang Laut

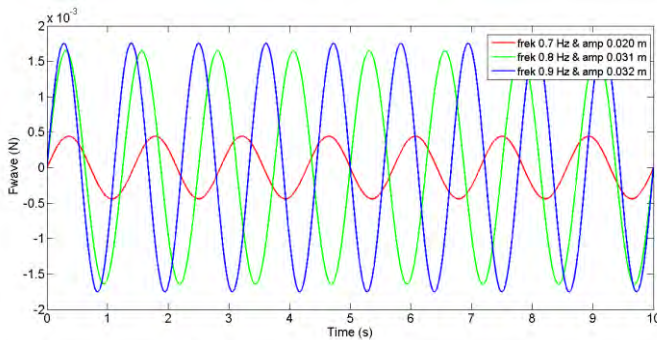
Gelombang laut yang disimulasikan adalah gelombang buatan dari kolam yang terdapat di laboratorium vibrasi dan sistem dinamis, pemodelan dengan menggunakan gelombang laut buatan ini bertujuan supaya energi bangkitan yang dihasilkan dari simulasi ini dapat dibandingkan dengan energi bangkitan yang dihasilkan dari studi eksperimen yang telah dilakukan sebelumnya.

Pada tabel 4.2 di bawah dapat dilihat variasi frekuensi, amplitudo, periode, dan tinggi gelombang yang didapatkan dari proses pengukuran pada studi eksperimen dan digunakan sebagai input pada proses simulasi menggunakan Simulink Matlab.

Tabel 4.2 Variasi Input

	1	2	3
Frekuensi (f)	0.7 Hz	0.8 Hz	0.9 Hz
Amplitudo (A)	0.020 m	0.031 m	0.032 m
Tinggi gelombang (H)	0.040 m	0.062 m	0.063 m
Periode (T)	1.429 s	1.250 s	1.111 s

Pada pemodelan dimasukkan input berupa *sin wave* dari variasi frekuensi, amplitudo, periode, dan tinggi gelombang yang nantinya akan menghasilkan F_{wave} dan F_{buoyancy} . Gambar 4.2 merupakan F_{wave} pada simulasi model mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut tipe *Salter Duck* dengan penambahan *flywheel* maupun tanpa *flywheel*.



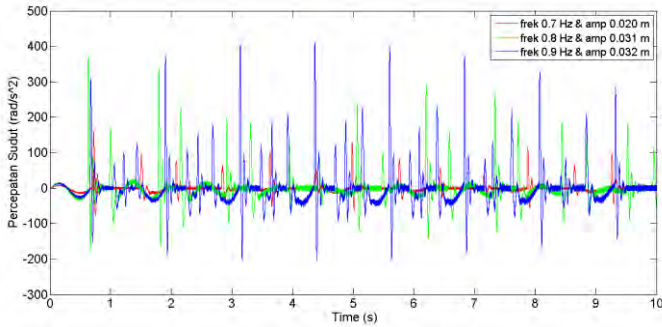
Gambar 4.2 F_{wave} yang Dihasilkan dari Variasi Frekuensi & Amplitudo

Dapat dilihat pada gambar 4.2 di atas bahwa grafik F_{wave} di atas semakin besar seiring naiknya frekuensi & amplitudo gelombang. Berdasarkan rumus $F_{\text{wave}} = \frac{\rho g^2 H^2 T^2 b}{32\pi\lambda}$, F_{wave} berbanding lurus dengan periode gelombang ($T = \frac{1}{f}$) sehingga saat frekuensi naik maka periode semakin turun, namun panjang gelombang (λ) yang merupakan fungsi dari periode ($\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}$) juga semakin turun sehingga F_{wave} yang dihasilkan akan semakin besar seiring naiknya amplitudo, dimana $A = \frac{1}{2}H$.

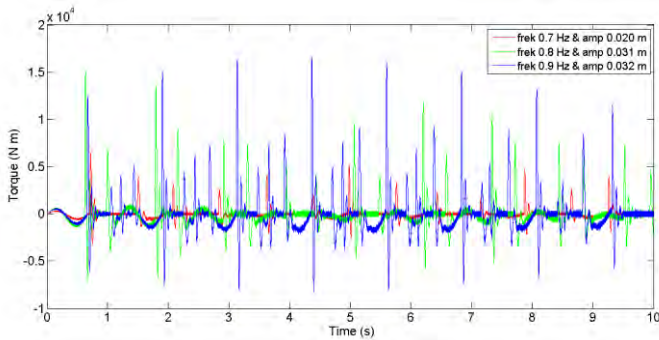
4.2.2 Percepatan Sudut (α) dan Torsi Poros Output

Setelah input *sin wave* tersebut dimasukkan ke sistem, maka akan didapat percepatan sudut (α) dan torsi dari poros output.

4.2.2.1 Model Mekanisme tanpa Penambahan *Flywheel*



(a)



(b)

Gambar 4.3 (a) Percepatan Sudut (α), dan (b) Torsi yang Dihasilkan Poros *Output* tanpa Penambahan *Flywheel*

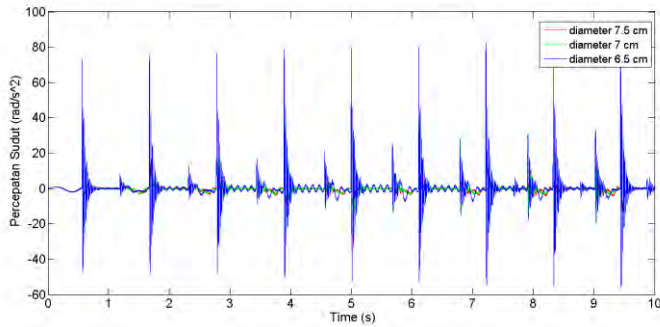
Pada gambar 4.3 (a) terlihat grafik percepatan sudut (α) dari poros *output* yang dihasilkan model mekanisme *salter duck* tanpa penambahan *flywheel*. Dapat dilihat pada grafik ini bahwa percepatan sudut (α) tidak stabil dengan nilai percepatan sudut (α) tertinggi didapat pada frekuensi 0.9 Hz dan amplitudo 0.032 m, sedangkan nilai percepatan sudut (α) terendah didapat pada frekuensi 0.7 Hz dan amplitudo 0.020 m.

Begitu pula pada gambar 4.3 (b) terlihat grafik torsi poros *output* tanpa penambahan *flywheel*. Dapat dilihat pada grafik ini bahwa torsi yang dihasilkan model mekanisme tanpa penambahan *flywheel* tidak stabil pula dengan nilai torsi tertinggi didapat pada frekuensi 0.9 Hz dan amplitudo 0.032 m, sedangkan nilai torsi terendah didapat pada frekuensi 0.7 Hz dan amplitudo 0.020 m.

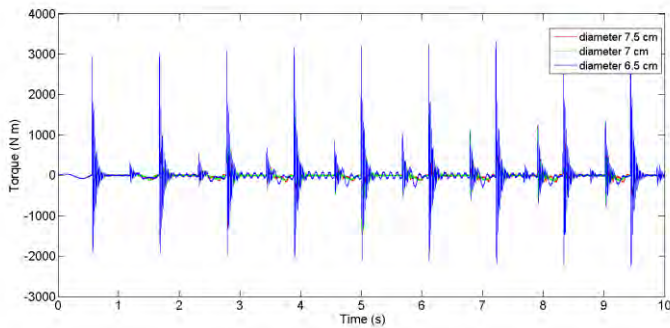
Dapat dilihat pada grafik bahwa percepatan sudut yang dihasilkan semakin besar seiring dengan kenaikan frekuensi. Hal ini dikarenakan frekuensi gelombang berbanding terbalik dengan periode gelombang, sehingga semakin besar frekuensi maka periode gelombang akan semakin kecil sehingga percepatan sudut yang dihasilkan akan semakin besar, sesuai dengan rumus $T = \frac{1}{f}$. Sedangkan torsi pada poros output ini berbanding lurus dengan percepatan sudut (α), dapat dibuktikan dari rumus $\tau = J \cdot \alpha$. Sehingga semakin besar percepatan sudut poros *output* maka semakin besar pula torsi yang dihasilkan.

4.2.2.2 Model Mekanisme dengan Penambahan *Flywheel*

Pada gambar 4.4 di bawah dapat dilihat grafik percepatan sudut (α) dan torsi yang dihasilkan poros output pada model mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut tipe *salter duck* dengan penambahan *flywheel* berdiameter 6.5 cm, 7 cm, dan 7.5 cm pada frekuensi 0.9 Hz & amplitudo 0.032 m.



(a)



(b)

Gambar 4.4 (a) Percepatan Sudut (α), dan (b) Torsi yang Dihasilkan Poros *Output* dengan Penambahan *Flywheel* pada Frekuensi 0.9 Hz dan Amplitudo 0.032 m

Pada gambar 4.4 (a) di atas terlihat grafik percepatan sudut (α) poros *output* yang dihasilkan model mekanisme *salter duck* dengan penambahan *flywheel* berdiameter 6.5 cm, 7 cm, dan 7.5 cm. Dapat dilihat pada grafik ini bahwa model mekanisme dengan penambahan *flywheel* selalu menghasilkan percepatan sudut (α) yang stabil, dengan nilai percepatan sudut (α) tertinggi didapat pada model mekanisme dengan *flywheel* berdiameter 6.5 cm, sedangkan nilai percepatan sudut (α) terendah didapat pada model mekanisme dengan *flywheel* berdiameter 7.5 cm.

Begitu pula pada gambar 4.4 (b) terlihat grafik torsi yang dihasilkan model mekanisme *salter duck* tanpa penambahan *flywheel*. Dapat dilihat pada grafik ini bahwa model mekanisme dengan penambahan *flywheel* selalu menghasilkan torsi yang stabil pula, dengan nilai torsi tertinggi didapat pada model mekanisme dengan *flywheel* berdiameter 6.5 cm, sedangkan nilai torsi terendah didapat pada model mekanisme dengan *flywheel* berdiameter 7.5 cm.

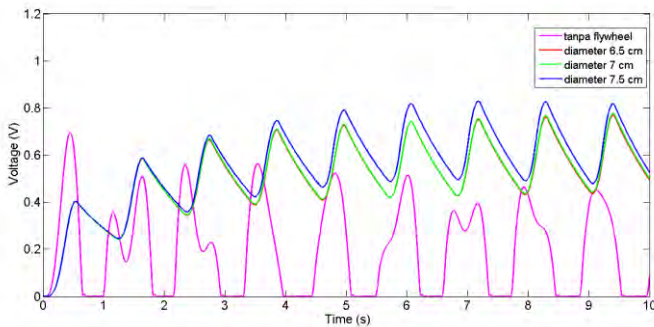
Dapat dilihat bahwa diameter *flywheel* berbanding terbalik dengan percepatan sudut (α). Hal ini dikarenakan semakin besar diameter *flywheel* maka momen *inertia* yang dihasilkan akan semakin besar sehingga menghasilkan percepatan sudut yang lebih kecil, sesuai dengan *state variable* pada *flywheel*, yaitu $\ddot{\theta}_f = \frac{1}{J_f} [-c_c \dot{\theta}_f - k_D \theta_f + c_c \dot{\theta}_7 + k_D \theta_7]$.

4.2.3 Energi Bangkitan yang Dihasilkan

Pada subbab ini akan dianalisa output dari simulasi yang berupa voltase, arus, dan daya dari masing-masing variasi.

4.2.3.1 Karakteristik Voltase yang Dihasilkan

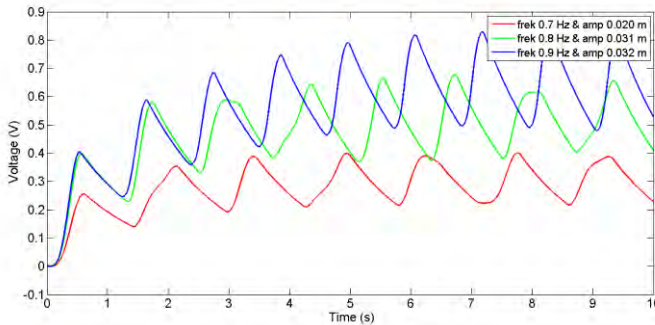
Dapat dilihat pada gambar di bawah yaitu grafik voltase yang dihasilkan dari generator pada simulasi model mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut tipe *salter duck* pada frekuensi 0.9 Hz dan amplitudo 0.032 m.



Gambar 4.5 Voltase yang Dihasilkan Model Mekanisme *Salter Duck* pada Frekuensi 0.9 Hz dan Amplitudo 0.032 m

Grafik voltase yang dihasilkan model mekanisme *salter duck* dengan penambahan *flywheel* memiliki tren semakin naik seiring berjalannya waktu, sedangkan grafik voltase yang dihasilkan model mekanisme *salter duck* tanpa penambahan *flywheel* trennya tidak stabil. Pada gambar 4.5 terlihat grafik voltase yang dihasilkan model mekanisme tanpa penambahan *salter duck* maupun dengan penambahan *flywheel* berdiameter 6.5 cm, 7 cm, dan 7.5 cm. Dapat dilihat pada grafik ini nilai voltase tertinggi terdapat pada model mekanisme dengan penambahan *flywheel* berdiameter 7.5 cm sedangkan nilai voltase terendah terdapat pada model mekanisme tanpa penambahan *flywheel*.

Sedangkan pada gambar di bawah yaitu grafik voltase yang dihasilkan dari generator pada simulasi model mekanisme PLTGL tipe *salter duck* dengan penambahan *flywheel* berdiameter 7.5 cm.

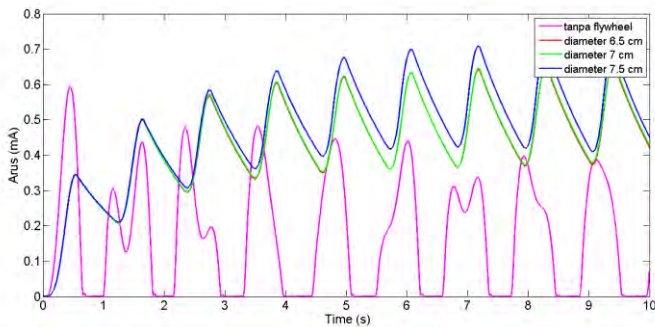


Gambar 4.6 Voltase yang Dihasilkan Model Mekanisme *Salter Duck* dengan Penambahan *Flywheel* Berdiameter 7.5 cm

Grafik voltase yang dihasilkan model mekanisme *salter duck* dengan penambahan *flywheel* berdiameter 7.5 cm memiliki tren semakin naik seiring berjalannya waktu. Pada gambar 4.6 terlihat grafik voltase yang dihasilkan model mekanisme *salter duck* dengan variasi frekuensi 0.7 Hz & amplitudo 0.020 m, frekuensi 0.8 Hz & amplitudo 0.031 m, dan frekuensi 0.9 Hz & amplitudo 0.032 m. Dapat dilihat pada grafik ini nilai voltase tertinggi terdapat pada variasi frekuensi 0.9 Hz dengan amplitudo 0.032 m, sedangkan nilai voltase terendah terdapat pada variasi frekuensi 0.7 Hz dengan amplitudo 0.020 m.

4.2.3.2 Karakteristik Arus yang Dihasilkan

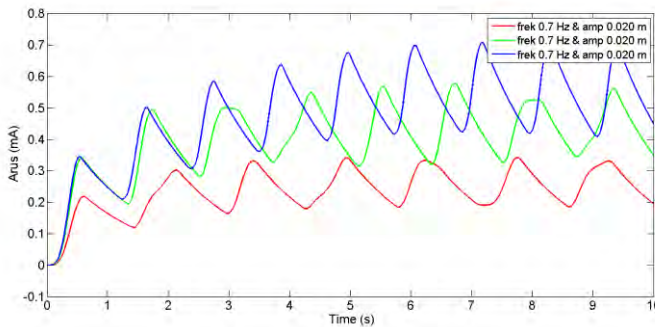
Dapat dilihat pada gambar di bawah yaitu grafik arus yang dihasilkan dari generator pada simulasi model mekanisme PLTGL tipe *salter duck* tanpa dan dengan penambahan *flywheel*, pada frekuensi 0.9 Hz dan amplitudo 0.032 m.



Gambar 4.7 Arus yang Dihasilkan Model Mekanisme *Salter Duck* pada Frekuensi 0.9 Hz dan Amplitudo 0.032 m

Grafik arus yang dihasilkan model mekanisme *salter duck* dengan penambahan *flywheel* memiliki tren semakin naik seiring berjalannya waktu, sedangkan grafik arus yang dihasilkan model mekanisme *salter duck* tanpa penambahan *flywheel* trennya tidak stabil. Pada gambar 4.7 terlihat grafik arus yang dihasilkan model mekanisme tanpa penambahan *salter duck* maupun dengan penambahan *flywheel* berdiameter 6.5 cm, 7 cm, dan 7.5 cm. Dapat dilihat pada grafik ini nilai arus tertinggi terdapat pada model mekanisme dengan penambahan *flywheel* berdiameter 7.5 cm sedangkan nilai arus terendah terdapat pada model mekanisme tanpa penambahan *flywheel*.

Sedangkan pada gambar di bawah yaitu grafik arus yang dihasilkan dari generator pada simulasi model mekanisme PLTGL tipe *salter duck* dengan penambahan *flywheel* berdiameter 7.5 cm.

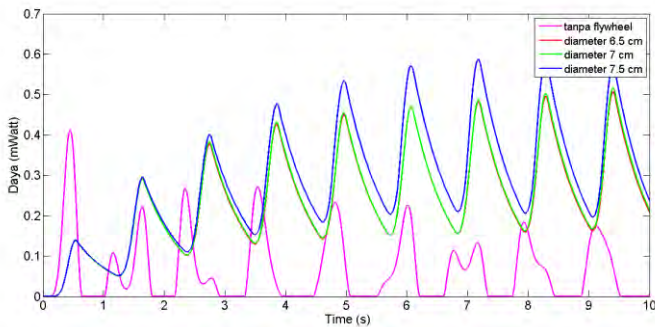


Gambar 4.8 Arus yang Dihasilkan Model Mekanisme *Salter Duck* dengan Penambahan *Flywheel* Berdiameter 7.5 cm

Grafik arus yang dihasilkan model mekanisme *salter duck* dengan penambahan *flywheel* memiliki tren semakin naik seiring berjalannya waktu. Pada gambar 4.8 terlihat grafik arus yang dihasilkan model mekanisme *salter duck* dengan variasi frekuensi 0.7 Hz & amplitudo 0.020 m, frekuensi 0.8 Hz & amplitudo 0.031 m, dan frekuensi 0.9 Hz & amplitudo 0.032 m. Dapat dilihat pada grafik ini nilai arus tertinggi terdapat pada variasi frekuensi 0.9 Hz dengan amplitudo 0.032 m, sedangkan nilai arus terendah terdapat pada variasi frekuensi 0.7 Hz dengan amplitudo 0.020 m.

4.2.3.3 Karakteristik Daya yang Dihasilkan

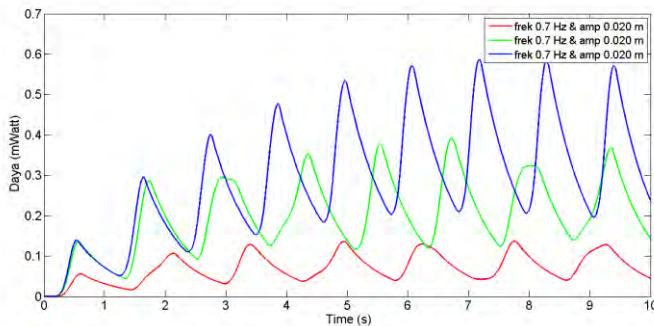
Dapat dilihat pada gambar 4.9 di bawah yaitu grafik daya yang dihasilkan dari generator pada simulasi model mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut tipe *salter duck* tanpa penambahan *flywheel* maupun dengan penambahan *flywheel* berdiameter 6.5 cm, 7 cm, dan 7.5 cm pada frekuensi 0.9 Hz dan amplitudo 0.032 m.



Gambar 4.9 Daya yang Dihasilkan Model Mekanisme *Salter Duck* pada Frekuensi 0.9 Hz dan Amplitudo 0.032 m

Grafik daya yang dihasilkan model mekanisme *salter duck* dengan penambahan *flywheel* memiliki tren semakin naik seiring berjalannya waktu, sedangkan grafik arus yang dihasilkan model mekanisme *salter duck* tanpa penambahan *flywheel* trennya tidak stabil. Pada gambar 4.9 terlihat grafik daya yang dihasilkan model mekanisme tanpa penambahan *salter duck* maupun dengan penambahan *flywheel* berdiameter 6.5 cm, 7 cm, dan 7.5 cm. Dapat dilihat pada grafik ini nilai daya tertinggi terdapat pada model mekanisme dengan penambahan *flywheel* berdiameter 7.5 cm sedangkan nilai daya terendah terdapat pada model mekanisme dengan penambahan *flywheel* berdiameter 6.5 cm.

Sedangkan pada gambar 4.10 di bawah yaitu grafik daya yang dihasilkan dari generator pada simulasi model mekanisme PLTGL tipe *salter duck* dengan penambahan *flywheel* berdiameter 7.5 cm dengan variasi frekuensi 0.7 Hz & amplitudo 0.020 m, frekuensi 0.8 Hz & amplitudo 0.031 m, serta frekuensi 0.9 Hz & amplitudo 0.032 m.



Gambar 4.10 Daya yang Dihasilkan Model Mekanisme *Salter Duck* dengan Penambahan *Flywheel* Berdiameter 7.5 cm

Grafik daya yang dihasilkan model mekanisme *salter duck* dengan penambahan *flywheel* memiliki tren semakin naik seiring berjalannya waktu. Pada gambar 4.10 di atas terlihat grafik daya yang dihasilkan model mekanisme dengan variasi frekuensi 0.7 Hz & amplitudo 0.020 m, frekuensi 0.8 Hz & amplitudo 0.031 m, dan frekuensi 0.9 Hz & amplitudo 0.032 m. Dapat dilihat nilai daya tertinggi terdapat pada variasi frekuensi 0.9 Hz dengan amplitudo 0.032 m, sedangkan nilai daya terendah terdapat pada variasi frekuensi 0.7 Hz dengan amplitudo 0.020 m.

4.3 Pembahasan

Pada subbab ini akan dibahas bagaimana energi bangkitan berupa voltase, arus, dan daya yang dihasilkan dari simulasi model mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut tipe *salter duck*. Dapat dilihat pada tabel 4.3 yaitu energi bangkitan rata-rata yang dihasilkan studi eksperimen dan tabel 4.4 yaitu energi bangkitan yang dihasilkan dengan proses simulasi model mekanisme.

Tabel 4.3 Energi bangkitan rata-rata yang dihasilkan dari eksperimen

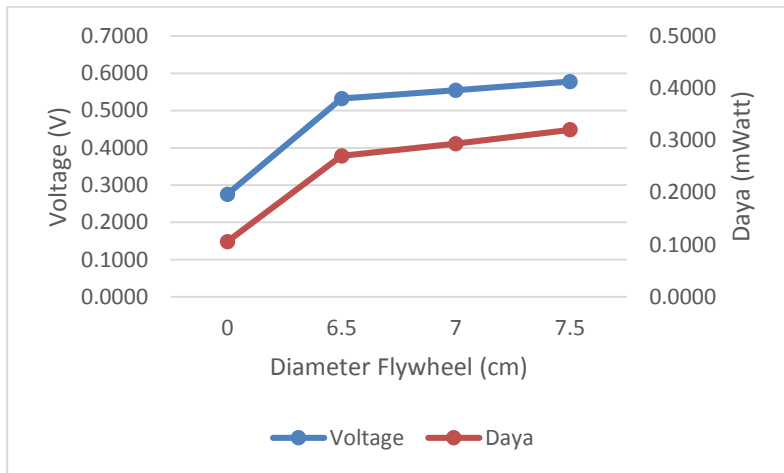
Diameter Flywheel (cm)	Frekuensi (Hz)	Eksperimen		
		Arus (A)	Vrms (V)	Daya (mWatt)
Tanpa Flywheel	0.7	0.00053	0.1673	0.08870
	0.8	0.00048	0.2101	0.13090
	0.9	0.00041	0.3117	0.10090
6,5	0.7	0.00060	0.1716	0.09953
	0.8	0.00050	0.2373	0.10916
	0.9	0.00030	0.3964	0.13478
7	0.7	0.00060	0.1793	0.10041
	0.8	0.00040	0.3071	0.12898
	0.9	0.00030	0.4515	0.15351
7,5	0.7	0.00050	0.1929	0.10417
	0.8	0.00050	0.3191	0.14998
	0.9	0.00030	0.5780	0.19652

Tabel 4.4 Energi bangkitan rata-rata yang dihasilkan dari simulasi

Diameter Flywheel (cm)	Frekuensi (Hz)	Simulasi		
		Arus (A)	Vrms (V)	Daya (mWatt)
Tanpa Flywheel	0.7	0.00015	0.1750	0.0503
	0.8	0.00021	0.2369	0.0737
	0.9	0.00024	0.2755	0.1059
6,5	0.7	0.00025	0.2852	0.0774
	0.8	0.00041	0.4788	0.2155
	0.9	0.00045	0.5321	0.2702
7	0.7	0.00025	0.2854	0.0775
	0.8	0.00041	0.4795	0.2164
	0.9	0.00046	0.5547	0.2936
7,5	0.7	0.00025	0.2879	0.0775
	0.8	0.00041	0.4824	0.2187
	0.9	0.00049	0.5779	0.3202

4.3.1 Pengaruh Penambahan *Flywheel* Terhadap Voltage dan Daya yang Dihasilkan

Dapat dilihat pada gambar 4.11 di bawah yaitu grafik voltage rms dan daya rms yang dihasilkan oleh simulasi model mekanisme PLTGL tipe *Salter Duck*.



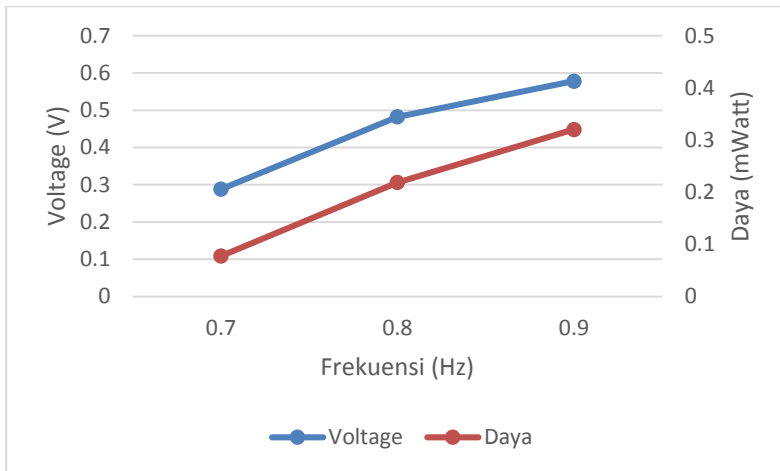
Gambar 4.11 Grafik Voltage rms dan Daya rms yang Dihasilkan Simulasi Model Mekanisme *Salter Duck* tanpa maupun dengan Penambahan *Flywheel* pada frekuensi 0.9 Hz & amplitudo 0.032 m

Dapat dilihat dari grafik di atas bahwa *trendline* voltage rms dan daya rms yang dihasilkan simulasi model mekanisme *salter duck* pada frekuensi 0.9 Hz dan amplitudo 0.032 m cenderung naik seiring bertambahnya diameter *flywheel*. Nilai voltage rms tertinggi dihasilkan pada model mekanisme *salter duck* dengan penambahan *flywheel* berdiameter 7.5 cm, sedangkan nilai voltage rms terendah dihasilkan pada model mekanisme tanpa penambahan *flywheel*. Begitu pula dengan nilai daya rms tertinggi dihasilkan pada model mekanisme *salter duck* dengan penambahan *flywheel* berdiameter 7.5 cm dan nilai daya rms terendah dihasilkan pada model mekanisme tanpa penambahan *flywheel*.

Nilai voltage rms dan daya rms yang cenderung mengalami kenaikan ini dipengaruhi oleh *inertia* dari *flywheel*. Berdasarkan rumus $\tau = J \cdot \alpha$, semakin besar *inertia flywheel* maka semakin besar torsi yang akan didistribusikan ke generator. Hal ini menyebabkan nilai voltage rms dan daya rms pada model mekanisme dengan penambahan *flywheel* berdiameter 7.5 cm lebih tinggi dibanding dengan *flywheel* berdiameter 7 cm, 6.5 cm, maupun tanpa *flywheel*.

4.3.2 Pengaruh Variasi Frekuensi & Amplitudo Terhadap Voltase dan Daya yang Dihasilkan

Pada gambar di bawah yaitu grafik voltage rms dan daya rms yang dihasilkan oleh simulasi model mekanisme PLTGL tipe *salter duck* dengan *flywheel* berdiameter 7.5 cm.



Gambar 4.12 Grafik Voltase rms dan Daya rms yang Dihasilkan Simulasi Model Mekanisme *Salter Duck* dengan Penambahan *Flywheel* berdiameter 7.5 cm

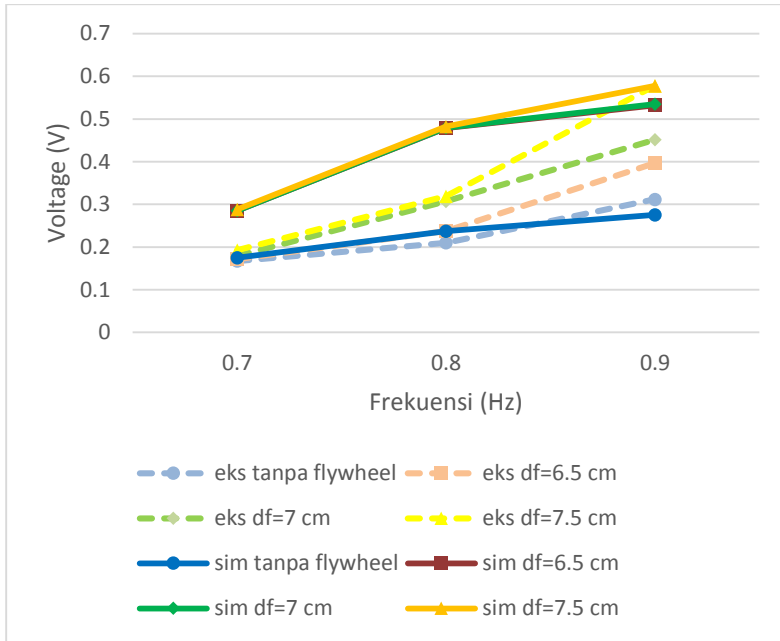
Dapat dilihat dari grafik di atas bahwa *trendline* voltage rms dan daya rms yang dihasilkan simulasi model mekanisme *salter duck* dengan penambahan *flywheel* berdiameter 7.5 cm

cenderung naik seiring bertambahnya frekuensi gelombang. Nilai voltage rms tertinggi dihasilkan model mekanisme *salter duck* pada frekuensi 0.9 Hz & amplitudo 0.032 m, dan nilai voltage rms terendah dihasilkan pada frekuensi 0.7 Hz & amplitudo 0.020 m. Begitu pula nilai daya rms tertinggi dihasilkan model mekanisme *salter duck* pada frekuensi 0.9 Hz & amplitudo 0.032 m, dan nilai daya rms terendah dihasilkan pada frekuensi 0.7 Hz & amplitudo 0.020 m.

Nilai V_{rms} dan daya yang cenderung mengalami kenaikan ini dipengaruhi oleh frekuensi dan amplitudo gelombang air. Berdasarkan rumus $P_{wave} = \frac{\rho g^2 H^2 T b}{32\pi}$, semakin besar periode dan tinggi gelombang maka semakin besar pula daya yang dihasilkan. Sedangkan berdasarkan rumus $P = I \cdot V$, voltage berbanding lurus dengan daya. Dimana semakin besar daya yang dihasilkan maka semakin besar pula voltage. Hal ini menyebabkan nilai V_{rms} pada frekuensi 0.9 Hz & amplitudo 0.032 m menjadi lebih tinggi dibanding dengan nilai V_{rms} pada frekuensi 0.8 Hz & amplitudo 0.031 m, maupun pada frekuensi 0.7 Hz & amplitudo 0.020 m. Begitu pula nilai daya pada frekuensi 0.9 Hz & amplitudo 0.032 m lebih tinggi dibanding dengan nilai daya pada frekuensi 0.8 Hz & amplitudo 0.031 m, maupun pada frekuensi 0.7 Hz & amplitudo 0.020 m.

4.3.3 Perbandingan antara Voltage rms Hasil Studi Eksperimen dan Simulasi Model Mekanisme

Dapat dilihat pada gambar 4.13 di bawah yaitu perbandingan voltage rms yang dihasilkan oleh studi eksperimen dengan simulasi model mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut tipe *salter duck*, baik tanpa penambahan *flywheel* maupun dengan penambahan *flywheel* berdiameter 6.5 cm, 7 cm, dan 7.5 cm.



Gambar 4.13 Grafik Perbandingan Voltage rms Hasil Studi Eksperimen dan Simulasi Model Mekanisme *Salter Duck*

Dapat dilihat dari gambar 4.13 di atas bahwa voltage rms yang dihasilkan pada studi eksperimen cenderung lebih rendah dibandingkan dengan voltage rms yang dihasilkan simulasi pada model mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut tipe *salter duck* tanpa maupun dengan penambahan *flywheel*. Hal ini dikarenakan oleh banyaknya *losses* yang terjadi pada saat dilakukannya eksperimen yang tidak diperhitungkan pada proses simulasi model mekanisme.

Nilai *error* pada proses simulasi ini dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\varepsilon_n = \frac{Vrms_{sim} - Vrms_{eks}}{Vrms_{sim}} \times 100\% \quad (4.1)$$

dimana: ε_n = *error*

$V_{rms_{sim}}$ = V_{rms} yang dihasilkan simulasi

$V_{rms_{seks}}$ = V_{rms} yang dihasilkan studi eksperimen

Hasil perhitungan *error* voltage rms dari masing-masing variasi diameter *flywheel* serta frekuensi dan amplitudo gelombang air dapat dilihat pada tabel 4.4 di bawah.

Tabel 4.4 *Error* yang Dihasilkan dari Perbandingan Voltage rms

Diameter Flywheel (cm)	Frekuensi (Hz)	Vrms (V)		Error (%)
		Eksperimen	Simulasi	
Tanpa Flywheel	0.7	0.1673	0.1750	4.40
	0.8	0.2101	0.2369	11.31
	0.9	0.3117	0.2755	13.14
6,5	0.7	0.1716	0.2852	39.83
	0.8	0.2373	0.4788	50.44
	0.9	0.3964	0.5321	25.50
7	0.7	0.1793	0.2854	37.18
	0.8	0.3071	0.4795	35.95
	0.9	0.4515	0.5547	15.56
7,5	0.7	0.1929	0.2879	33.00
	0.8	0.3191	0.4824	33.85
	0.9	0.578	0.5779	0.02

Dari hasil perhitungan di atas didapat *error* rata-rata antara voltage rms yang dihasilkan studi eksperimen dan voltage rms yang dihasilkan simulasi model mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Listrik tipe *salter duck* tanpa maupun dengan penambahan *flywheel* yaitu sebesar 25.02%.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

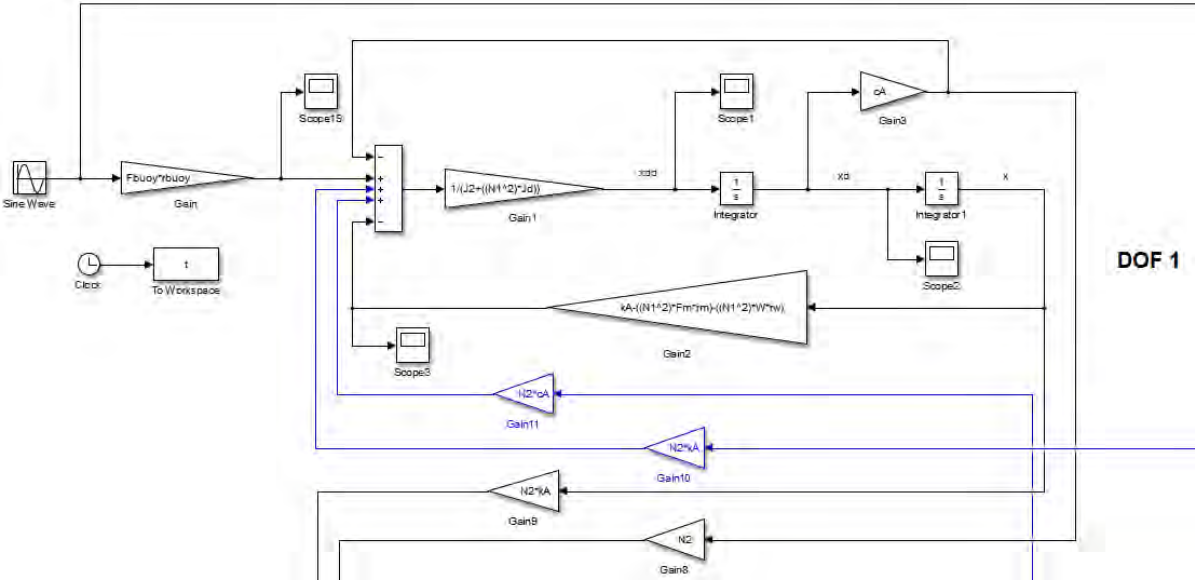
Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakteristik energi bangkitan berupa voltase, arus, dan daya yang dihasilkan oleh model mekanisme *salter duck* dengan penambahan *flywheel* lebih besar dibandingkan dengan energi bangkitan yang dihasilkan oleh model mekanisme tanpa penambahan *flywheel*. Hal ini terbukti dari nilai voltase rms tertinggi pada frekuensi 0.9 Hz dengan amplitudo 0.032 m yaitu sebesar 0.5779 V, nilai arus rms tertinggi yaitu sebesar 0.00049 A, dan nilai daya rms tertinggi yaitu sebesar 0.3202 mWatt yang mana ketiganya didapat dari variasi diameter *flywheel* 7.5 cm.
2. Karakteristik energi bangkitan berupa voltase, arus, dan daya yang dihasilkan model mekanisme *salter duck* semakin besar seiring naiknya frekuensi & amplitudo gelombang. Hal ini terbukti dari nilai voltase rms tertinggi pada model mekanisme dengan penambahan *flywheel* berdiameter 7.5 cm yaitu sebesar 0.5779 V, nilai arus rms tertinggi yaitu sebesar 0.00049 A, dan nilai daya rms tertinggi yaitu sebesar 0.3202 mWatt yang mana ketiganya didapat dari variasi frekuensi 0.9 Hz & amplitudo 0.032 m.
3. Energi bangkitan yang dihasilkan dari simulasi cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan energi bangkitan hasil studi eksperimen model mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut tipe *salter duck* dengan error rata-rata sebesar 25.02%.

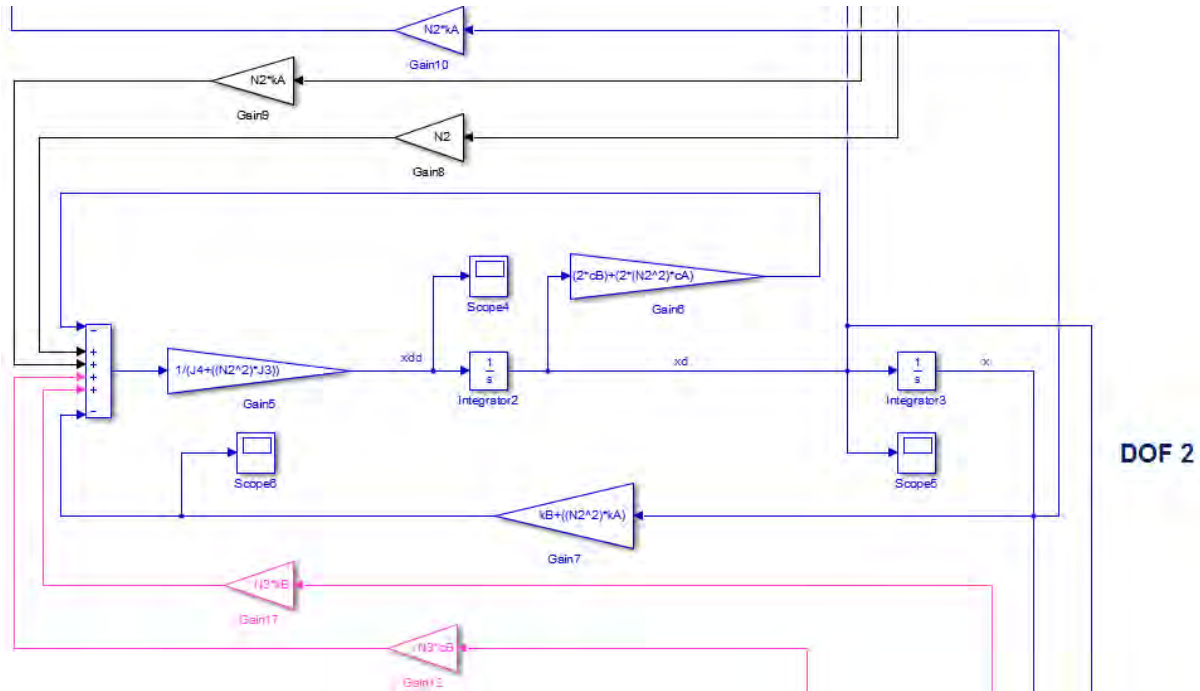
5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan di atas maka dapat diambil saran yaitu untuk penelitian selanjutnya lebih baik dilakukan validasi antara energi bangkitan yang dihasilkan studi eksperimen dengan energi bangkitan yang dihasilkan simulasi model mekanisme *salter duck* sehingga error yang dihasilkan tidak terlalu besar.

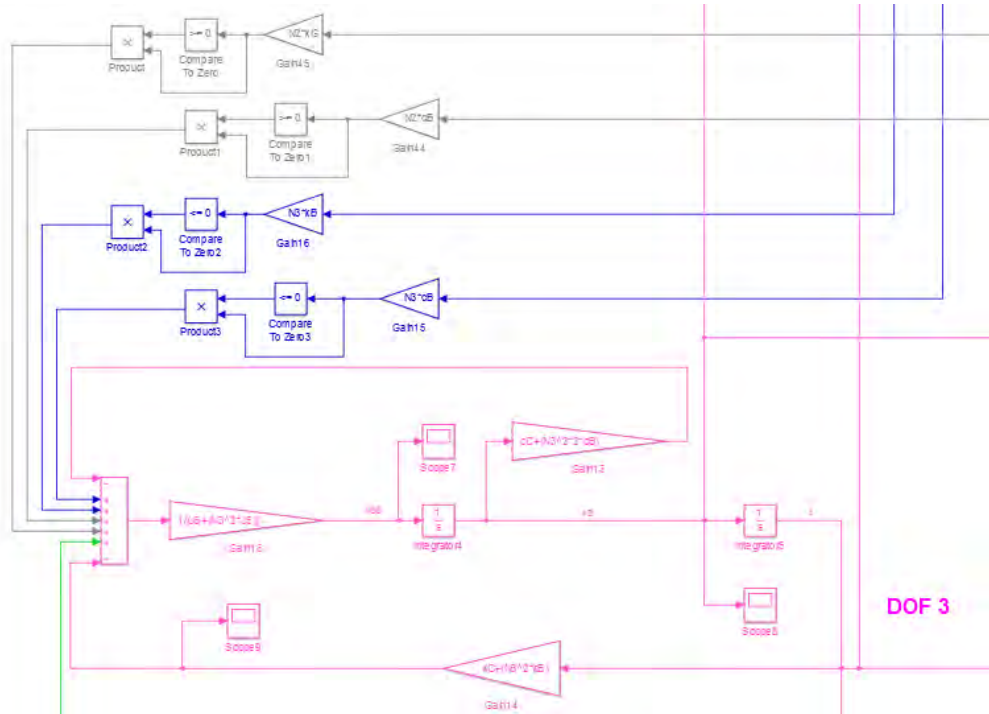
Block diagram DOF 1 (duck 1 & sprocket 2)



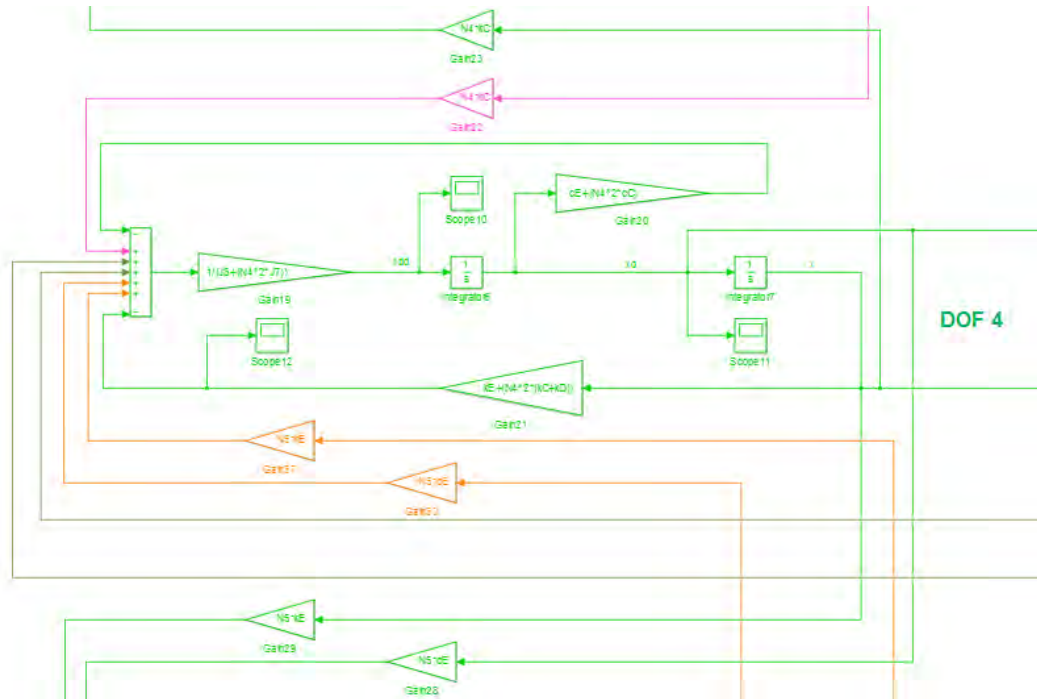
Block diagram DOF 2 (gear 3 & gear 4)



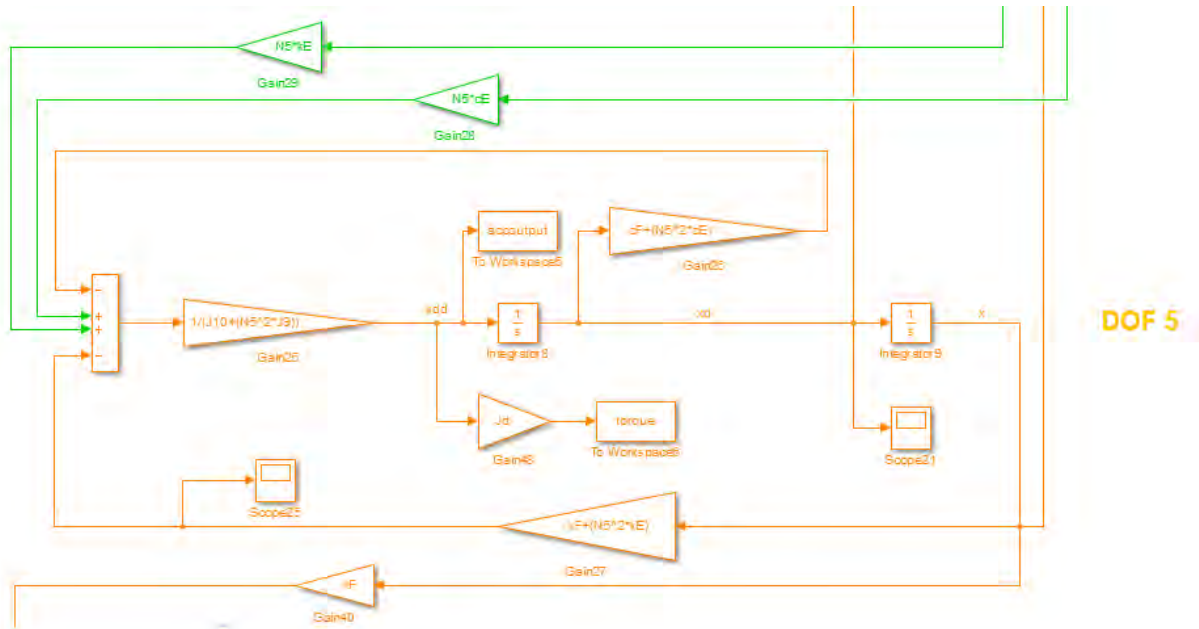
Block diagram DOF 3 (gear 5 & gear 6)



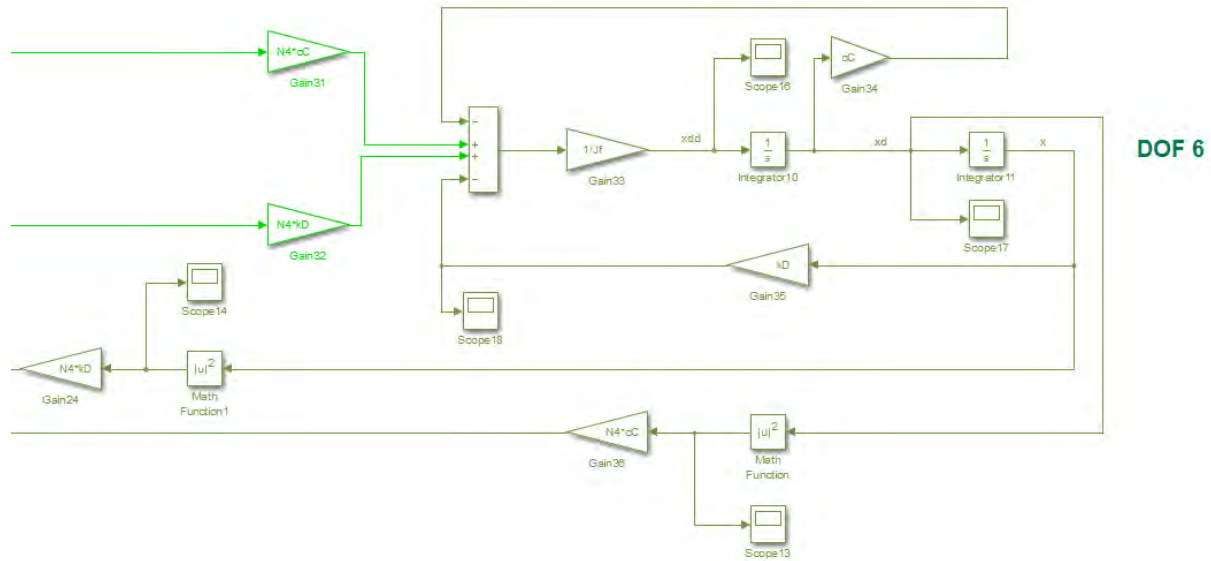
Block diagram DOF 4 (gear 7 & gear 8)



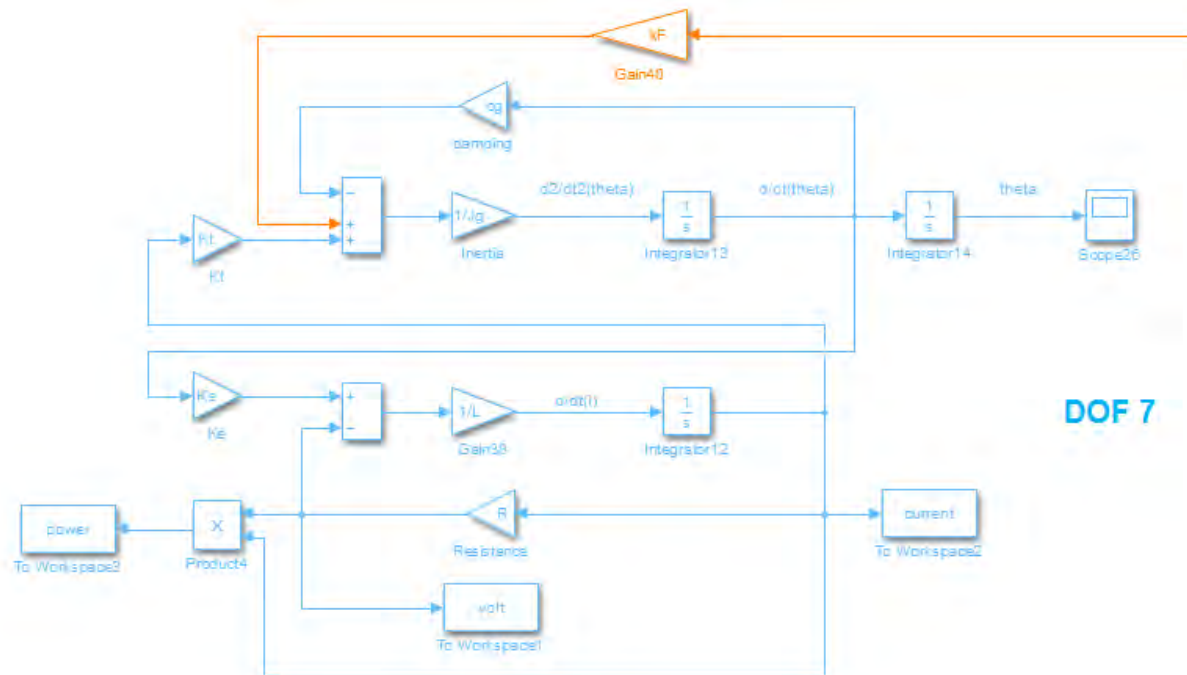
Block diagram DOF 5 (gear 9 & gear 10)



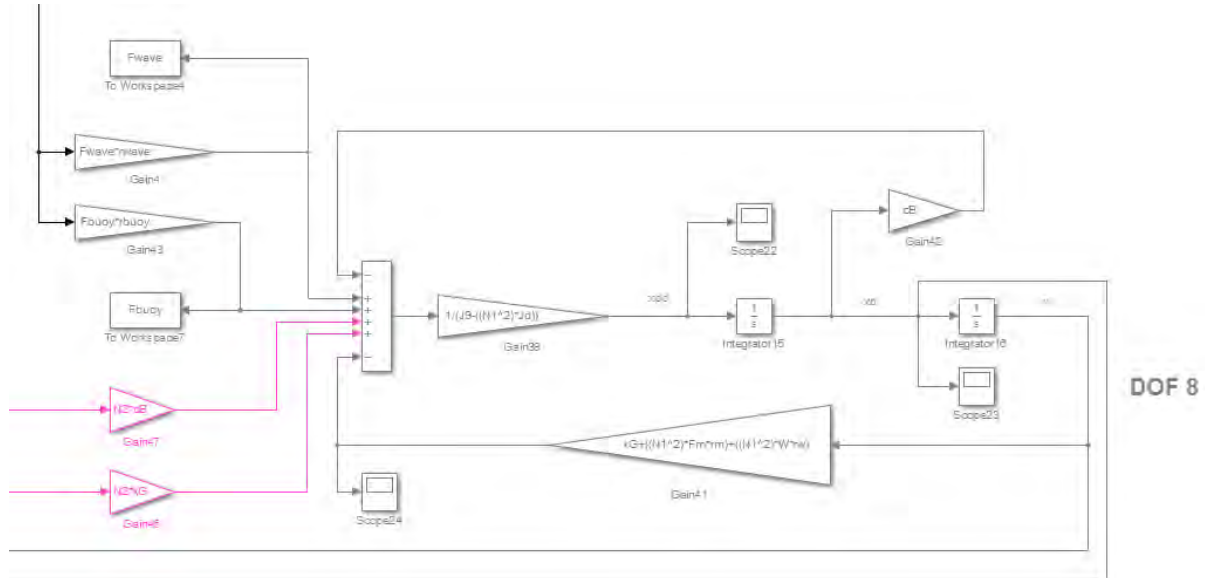
Block diagram DOF 6 (flywheel)



Block diagram DOF 7 (generator)



Block diagram DOF 8 (duck 1 & sprocket 11)



DAFTAR PUSTAKA

- Aguda, Muh. Akbar. 2015. “**Studi Karakteristik Energi Listrik yang Dihasilkan Model Mekanisme PLTGL Sistem *Salter Duck* Akibat Pengaruh Variasi Diameter *Flywheel* dan Frekuensi Gelombang**”. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin FTI ITS.
- Albi, Taufik Nasrul. 2014. “**Studi Eksperimen dan Analisa Energi Listrik yang Dihasilkan Mekanisme PLTGL tipe *Salter Duck* dengan Variasi Penambahan Beban pada *Beak Salter Duck***”. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin FTI ITS.
- Close, C.M., Frederic, D.K., dan Newell, J.C. 2002. “***Modelling and Analysis of Dynamic System, 3rd edition***”. Hoboken: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- F. O. Falcão, António. 2014. “***Modelling of Wave Energy Conversion***”. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Hibbeler. R. C. 2010. “***Engineering Mechanics Dynamics. Twelfth Edition***”. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
- Khaligh, Alireza and Onar, Omer C. 2009. “***Energy Harvesting: Solar, Wind, and Ocean Energy Conversion Systems***”. CRC Press.
- Kurniawan, Luthfi P. 2014. “**Studi Perancangan *Prototype* Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Tipe *Salter Duck***”. Surabaya: Jurusan Sistem Perkapalan FTK ITS.
- McCormick, Michael. 2010. “***Ocean Engineering Mechanics with Application***”. Cambridge University Press. New York.
- Rao, Singiresu. 2004. “***Mechanical Vibration, 5th Edition***”, Pearson Education.Inc, United State of America.

Oseanografi Dan Ilmu Kelautan. 14 Januari 2011. “**Gelombang Laut**”.(<http://jun13oseanografidanilmukelautan.blogspot.com/2011/01/gelombang-laut.html>)

PITTMAN. 2002. “**DC030B-3 (8224) Brush DC Motor Specification.**” <http://www.pittman-motors.com/Brush-DC-Motors/8224-Brush-DC-Motor.aspx>

TGJ-LIPI. 22 November 2004. “**Pengembangan Energi Terbarukan Sebagai Energi Aditif di Indonesia**”. (<http://www.energi.lipi.go.id/utama.cgi?artikel&1101089425&9>)

RIWAYAT PENULIS



Sinta Khalida Marlisa dilahirkan di Jakarta pada tanggal 11 Januari 1993. Penulis merupakan putri pertama dari 3 bersaudara.

Penulis memulai pendidikan dasar di SD Negeri Sukatani 4 dan lulus pada tahun 2004, lalu melanjutkan studi ke SMP Negeri 11 Depok dan lulus pada tahun 2007, kemudian penulis melanjutkan studi ke SMA Negeri 2 Depok dan lulus pada tahun 2010. Setelah masa studi SMA selesai, penulis melanjutkan studi program

Diploma di PNJ (Politeknik Negeri Jakarta) dengan jurusan Teknik Mesin, Program Studi *Maintenance* dan lulus pada tahun 2013. Pada awal tahun 2014 penulis melanjutkan program sarjana di jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Terdaftar di Jurusan Teknik Mesin-ITS dengan Nomor Register Pokok 2113106001. Penulis mengambil Tugas Akhir dengan judul “Pemodelan dan Analisa Energi Listrik Akibat Pengaruh Penambahan *Flywheel* pada Model Mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut tipe *Salter Duck*” dengan harapan agar ilmu yang telah didapatkan dapat berguna untuk agama dan negara. Penulis dapat dihubungi melalui email dibawah ini:

sintakhalida@rocketmail.com

(Halaman ini sengaja dikosongkan)